



SNCF

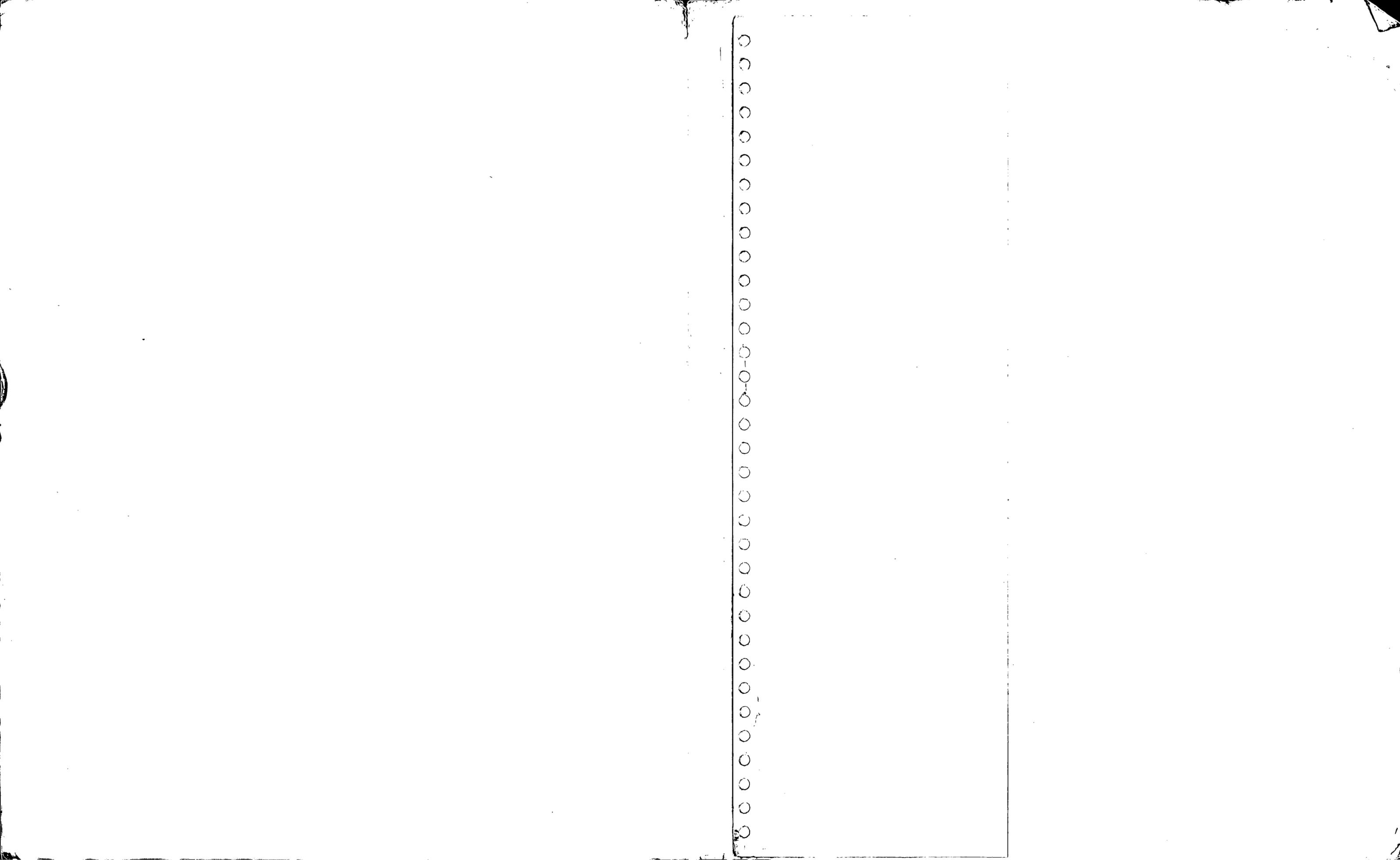
Nouvelle liaison ferroviaire Lyon - Turin

Etude du franchissement alpin



Infrastructure et transport
février 1993

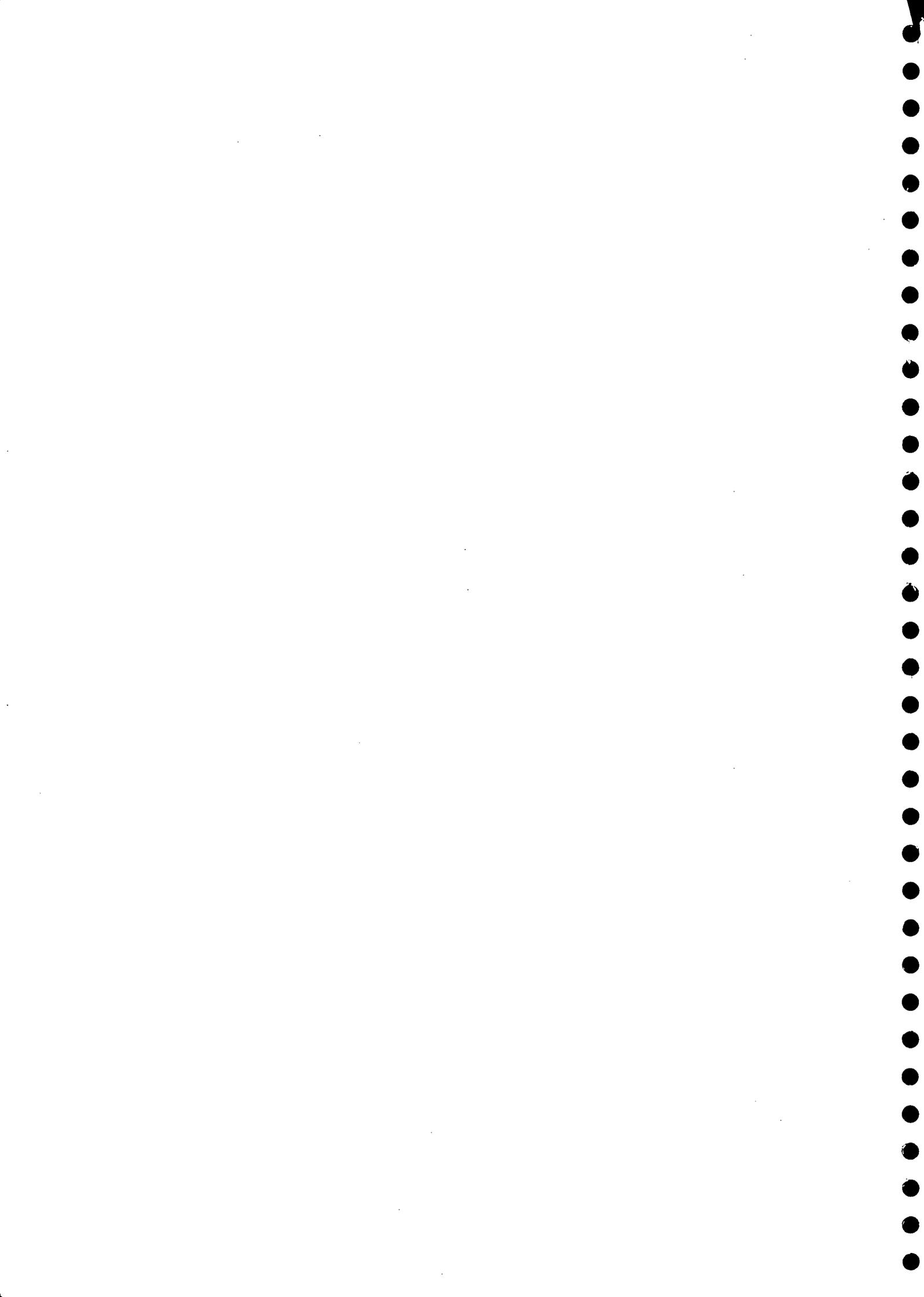
CDAT
11610 D



**NOUVELLE LIAISON FERROVIAIRE
LYON - TURIN
ETUDE DU FRANCHISSEMENT ALPIN**

INFRASTRUCTURE ET TRANSPORT

116 10



**RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL
INFRASTRUCTURE ET TRANSPORT**

	Page
I - LES OBJECTIFS DU GROUPE DE TRAVAIL, ORGANISATION ET METHODE DE TRAVAIL	3
II - LA SITUATION ACTUELLE ENTRE CHAMBERY ET TURIN	9
III - LE TUNNEL DE BASE SOUS LE MONT D'AMBIN DESCRIPTION GENERALE DE L'OUVRAGE	19
IV - LA SECURITE DANS LE TUNNEL DE BASE : UNE SOLUTION BITUBE, SANS GALERIE DE SERVICE, AVEC GARE INTERMEDIAIRE A MODANE	33
V - LA PRISE EN COMPTE DE L'AERODYNAMIQUE ET DE LA THERMIQUE DANS LE TUNNEL DE BASE	41
VI - LES ETUDES D'EXPLOITATION, LES LIGNES D'ACCES AU TUNNEL DE BASE	49
VII - LE CONTEXTE GEOLOGIQUE DU TUNNEL DE BASE	63
VIII - L'INCIDENCE DE LA GEOLOGIE SUR LA CONCEPTION ET LA REALISATION DU TUNNEL DE BASE	71
IX - ASPECT ENVIRONNEMENTAL	89
X - DUREE DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DE BASE	97
XI - COUT PREVISIONNEL DE LA LIAISON	101
XII - CAS PARTICULIER DE L'AUTOROUTE FERROVIAIRE	107
XIII - PROPOSITIONS POUR LA POURSUITE DES ETUDES	115
- ANNEXES	

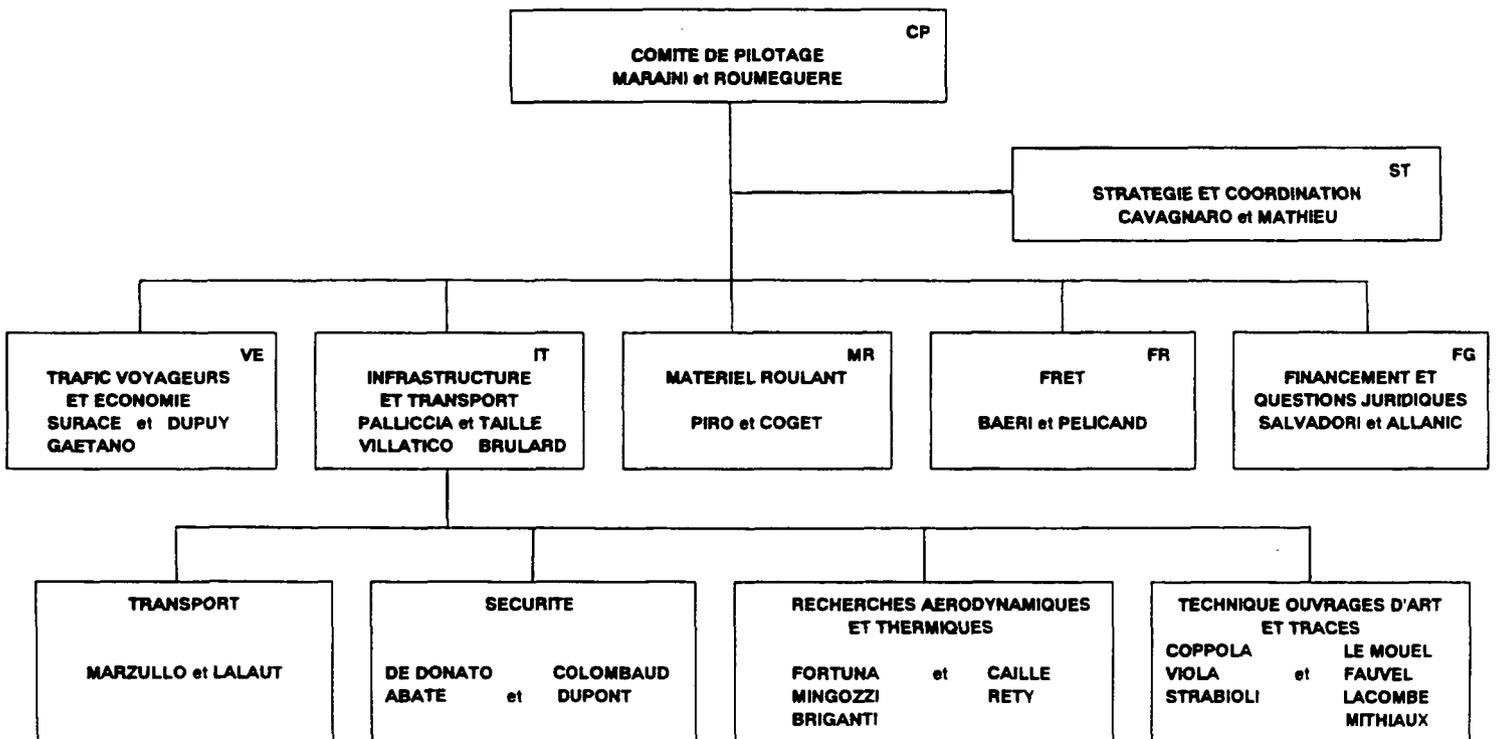
I LES OBJECTIFS DU GROUPE DE TRAVAIL, ORGANISATION ET METHODE DE TRAVAIL

LES OBJECTIFS DU GROUPE INFRASTRUCTURE ET TRANSPORT

Le groupe de travail Infrastructure et Transport a approfondi la consistance des infrastructures à réaliser et les coûts correspondants, dans diverses hypothèses de trafics voyageurs et fret.

Il a en particulier précisé la configuration du tunnel de base de 54 km sous le mont d'Ambin entre Saint-Jean-de-Maurienne et Suse afin de satisfaire les exigences d'exploitation et de sécurité. Le projet prend en compte les mesures propres à assurer la sécurité des usagers, les installations permettant d'assurer une capacité de la ligne suffisante et une bonne régularité, les effets aérodynamiques et thermiques, les gabarits à dégager, les objectifs en matière de durée de réalisation du tunnel (avec mise en service partielle éventuelle), les contraintes géotechniques et hydrauliques (sur la base de campagnes de reconnaissance)...

En outre le groupe de travail a défini différents niveaux d'équipement pour les lignes d'accès au tunnel, en fonction de la nature des trafics à acheminer et des performances souhaitées.



ORGANIGRAMME DES GROUPES DE TRAVAIL FRANCO-ITALIENS

ORGANISATION DU GROUPE INFRASTRUCTURE ET TRANSPORT

La présidence du groupe est assurée par :

MM. PALLICCIA et VILLATICO (F.S.-ITALFERR-Sis t.a.v.)
M. TAILLE (S.N.C.F.)

Le secrétariat est assuré par les F.S.

Secrétaire : Mme FRASCA

Les études ont porté principalement sur les domaines suivants :

- études d'infrastructure : forages profonds et campagnes sismiques sur les itinéraires reconnus possibles pour le tunnel de base, études géologiques, hydrographiques, topographiques, études et simulations aérodynamiques et thermiques (tunnels), équipements (voie, électrification, signalisation, systèmes de ventilation et de refroidissement), études de tracé des lignes d'accès au tunnel de base,
- études d'exploitation et de sécurité : simulations, études de risques.

Compte tenu de la complexité des domaines concernés par les études, le travail a été divisé entre les quatre sous-groupes suivants :

- Sous-Groupe Transport
Responsables : M. MARZULLO (F.S.-Italferr-Sis t.a.v.)
M. LALAUT (S.N.C.F.)
- Sous-Groupe Sécurité
Responsables : M. DE DONATO, Mme ABATE (F.S.-Italferr-Sis t.a.v.)
MM. COLOMBAUD, DUPONT (S.N.C.F.)
- Sous-Groupe Recherches Aérodynamiques et Thermiques
Responsables : MM. FORTUNA, MINGOZZI,
BRIGANTI (F.S.-Italferr-Sis t.a.v.)
MM. CAILLE, RETY (S.N.C.F.)
- Sous-Groupe Technique Ouvrages d'Art, Tracés,...
Responsables : MM. COPPOLA, VIOLA,
STRABIOLI (F.S.-Italferr-Sis t.a.v.)
MM. LE MOUËL, FAUVEL, LACOMBE,
MITHIAUX (S.N.C.F.)

La coordination des sous-groupes est assurée par :

M. VIOLA (F.S. - Italferr-Sis t.a.v.)
M. BRULARD (S.N.C.F.)

OBJECTIFS ET ACTIVITE DES SOUS-GROUPES

Sous-Groupe Transport

Les objectifs du sous-groupe ont été :

- définir un modèle d'exploitation de principe ;
- définir les dispositions constructives nécessitées par l'exploitation (communications pair/impair, etc...) ;
- examiner la capacité de l'ensemble des 2 lignes (ligne nouvelle et ligne existante) suivant différentes hypothèses d'exploitation, sur la base des prévisions de trafic fournies par les groupes "Fret" et "Trafic Voyageurs et Economie".

Le sous-groupe a travaillé avec les moyens à disposition des réseaux, notamment pour établir les modèles d'exploitation.

Il a développé des hypothèses d'exploitation décrites dans le chapitre VI.

Sous-Groupe Sécurité

Les objectifs du sous-groupe ont été :

- faire la synthèse des études existantes sur les longs tunnels,
- définir les dispositions constructives visant à garantir la sécurité dans le tunnel de base,
- définir les mesures à adopter en exploitation pour garantir la sécurité (d'entente avec le sous-groupe Transport).

Les recherches bibliographiques ont été réalisées dans les domaines suivants :

- plan de secours des grands tunnels existants,
- essais d'incendie sur le matériel ferroviaire,
- analyse d'incidents survenus en tunnel.

Le sous-groupe s'est appuyé sur des modélisations physiques réalisées au CERG à Grenoble pour les études de désenfumage.

La synthèse des recherches et les propositions du sous-groupe sont décrites dans le chapitre IV.

Sous-Groupe Recherches Aérodynamiques et Thermiques

Les objectifs du sous-groupe ont été :

- Analyser les aspects aérodynamiques et thermiques (à l'aide, en cas de besoins, d'essais spécifiques) concernant la résistance à l'air et les surpressions, dans le but d'orienter le choix :
- a) de la typologie monotube/bitube (avec un examen particulier de l'influence des rameaux de pistonement pour la solution bitube),
- b) de la section libre,
- c) des dispositions à adopter pour le matériel roulant,
- d) des dispositions relatives à la ventilation, à l'extraction des fumées et autres points particuliers.
- Définir et estimer le coût des équipements nécessaires tant en phase de construction qu'en phase d'exploitation.

Le sous-groupe s'est adjoint l'assistance de bureaux d'études extérieurs :

- INERIS pour la ventilation et le désenfumage,
- BERTIN - TROUVIN pour le refroidissement,
- CERG pour les maquettes aérodynamiques.

Les études réalisées par le sous-groupe sont décrites dans le chapitre V.

Sous-Groupe Technique Ouvrages d'Art et Tracés

Les objectifs du sous-groupe ont été :

- faire le projet technique du tunnel sur la base des éléments fournis par les autres sous-groupes et des résultats des sondages géologiques,
- estimer les coûts de construction et les temps de réalisation, comprenant également une analyse de la nécessité de galeries de reconnaissance,
- indiquer les solutions envisageables pour la mise en dépôt des terres excavées,
- examiner la possibilité d'une réalisation phasée du tunnel.

Les tronçons d'accès Montmélian - Saint-Jean-de-Maurienne et Turin - Susa ont été étudiés séparément par chaque réseau de façon autonome, en respectant toutefois les critères généraux définis pour la nouvelle infrastructure.

Pour les investigations géologiques, le sous-groupe s'est adjoint l'assistance de :

- l'Université Joseph FOURIER (I.R.I.G.M.) de Grenoble,
- C.G.G. et PROGEO pour la géophysique,
- FORACO, BRGM et TECNOSOL pour les sondages.

La description générale du tunnel de base sous le Mont d'Ambin est reprise au chapitre III.

II LA SITUATION ACTUELLE ENTRE CHAMBERY ET TURIN

Dans la présente étude, on a supposé réalisée la section de ligne voyageurs à grande vitesse Lyon - Montmélian permettant la desserte de Chambéry.

De Chambéry à Modane

La longueur de la section de ligne actuelle entre Chambéry et Modane gare est de 98,3 km.

A Montmélian et Saint-Pierre-d'Albigny sont greffées les bifurcations des lignes se dirigeant respectivement vers Grenoble et vers la vallée de la Tarentaise.

La ligne à double voie est électrifiée en 1500 volts courant continu alimenté par 10 sous-stations.

L'espacement des trains est assuré par un Block Automatique et Lumineux (B.A.L.) avec, pour les circulations à contre-sens, l'aménagement de 8 postes de changement de voie dont 3 sont télécommandés par le Poste de Commandement (P.C.) de Chambéry.

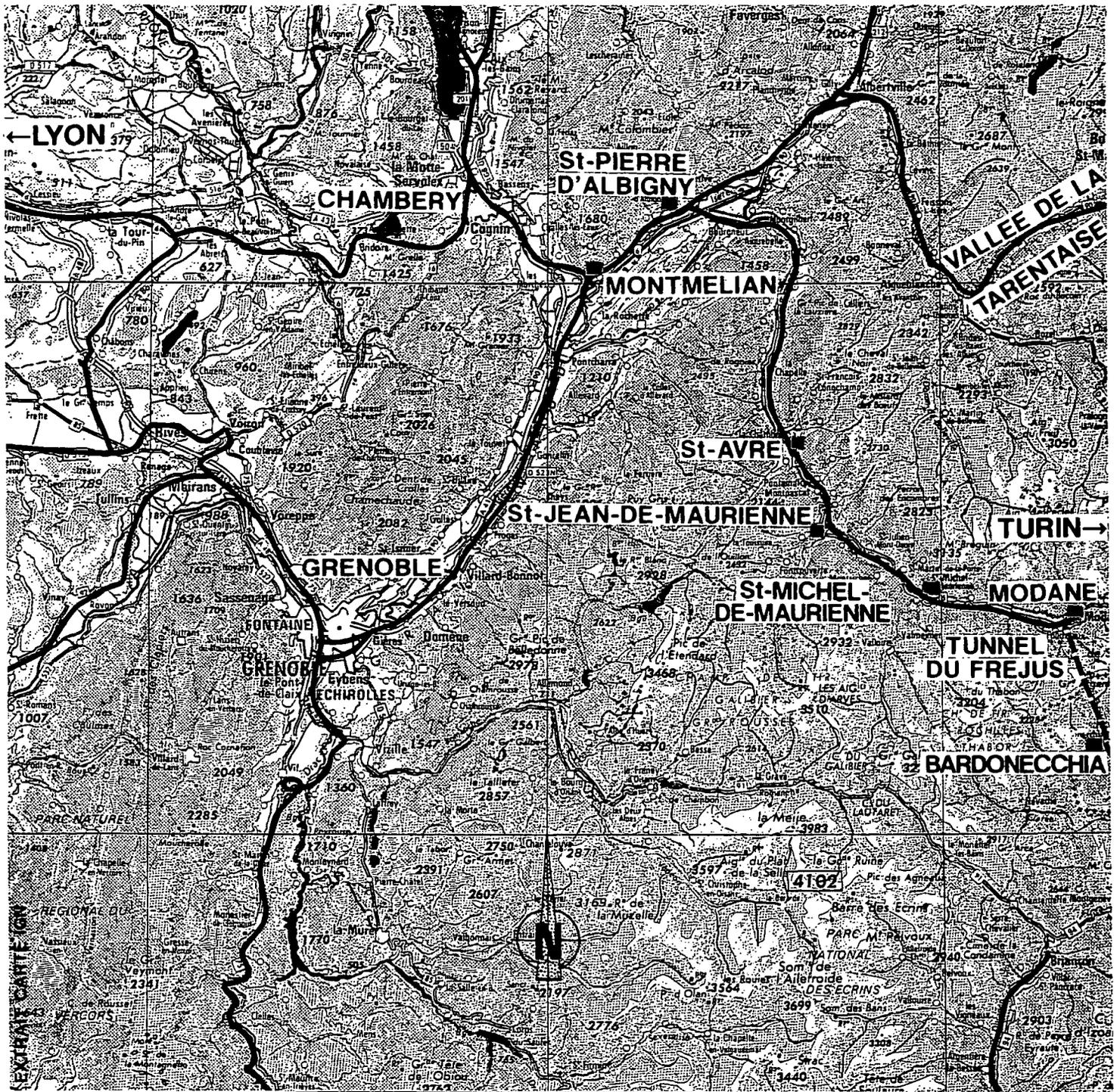
L'ensemble du parcours est équipé de la radio sol-train sans transmission de données.

La vitesse de la ligne est de 120 km/h (localement 100 km/h) et les rampes ne dépassent pas 15 °/° de Montmélian à Saint-Jean-de-Maurienne.

Le programme de dégagement du gabarit B s'achève, le gabarit B+ ayant été dégagé dès lors que le dégagement du seul gabarit B nécessitait déjà d'importants travaux.

Le parcours Saint-Jean-de-Maurienne - Modane est caractérisé par :

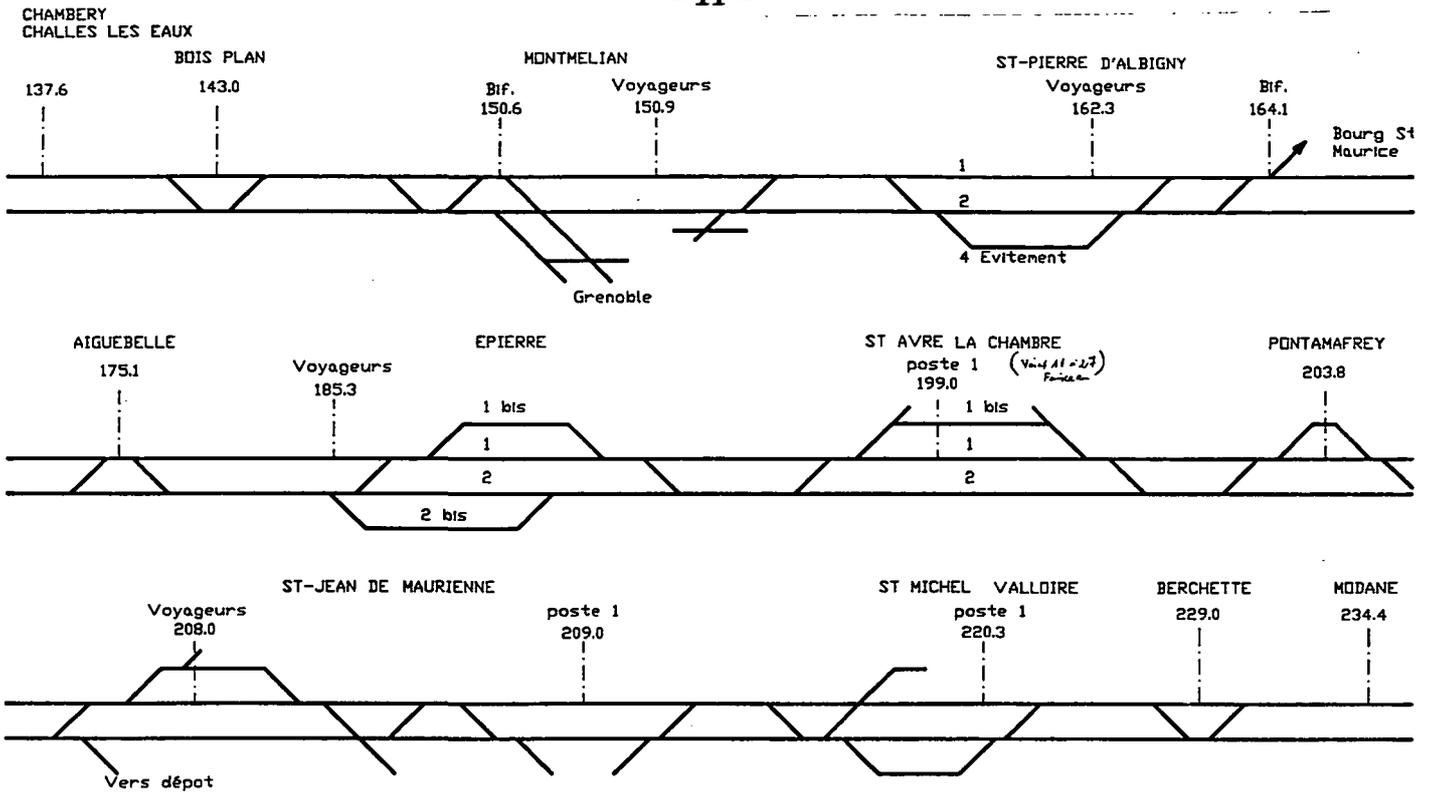
- de fortes déclivités (atteignant 30 °/° entre Saint-Michel-de-Maurienne et Modane) ;
- des vitesses de ligne entre 80 et 100 km/h ;
- de nombreux souterrains (16 tunnels et galeries totalisant 4 km de longueur pour un parcours de 28 km) ;
- des conditions de traction difficiles (le recours à des machines de pousse est presque systématique pour les trains de fret et de messagerie) ;
- des interruptions de lignes fréquentes dues à des coulées de boue.



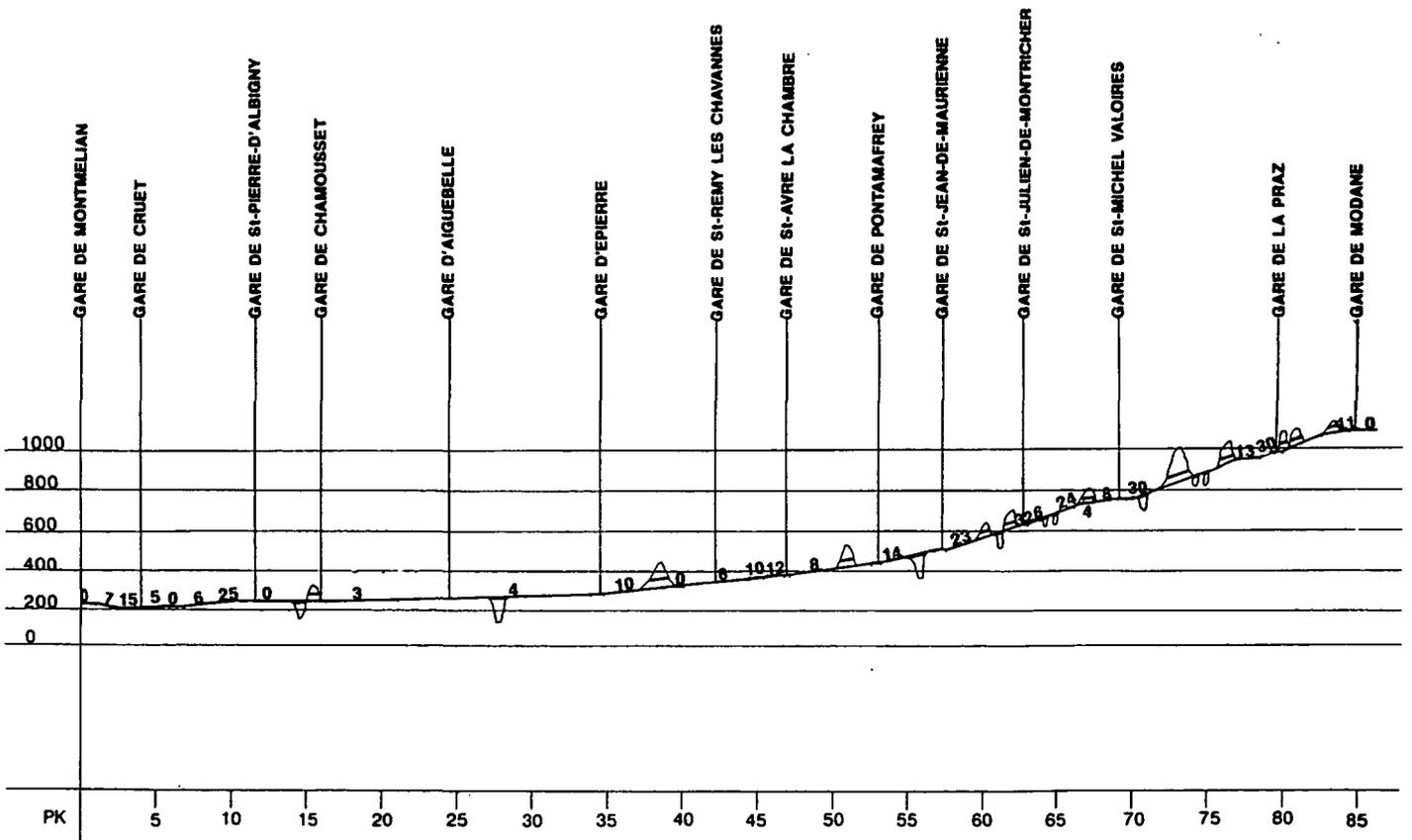
NOUVELLE LIAISON FERROVIAIRE LYON-TURIN
COTE FRANÇAIS
SITUATION ACTUELLE

0 km 10 km 20 km 30 km 40 km

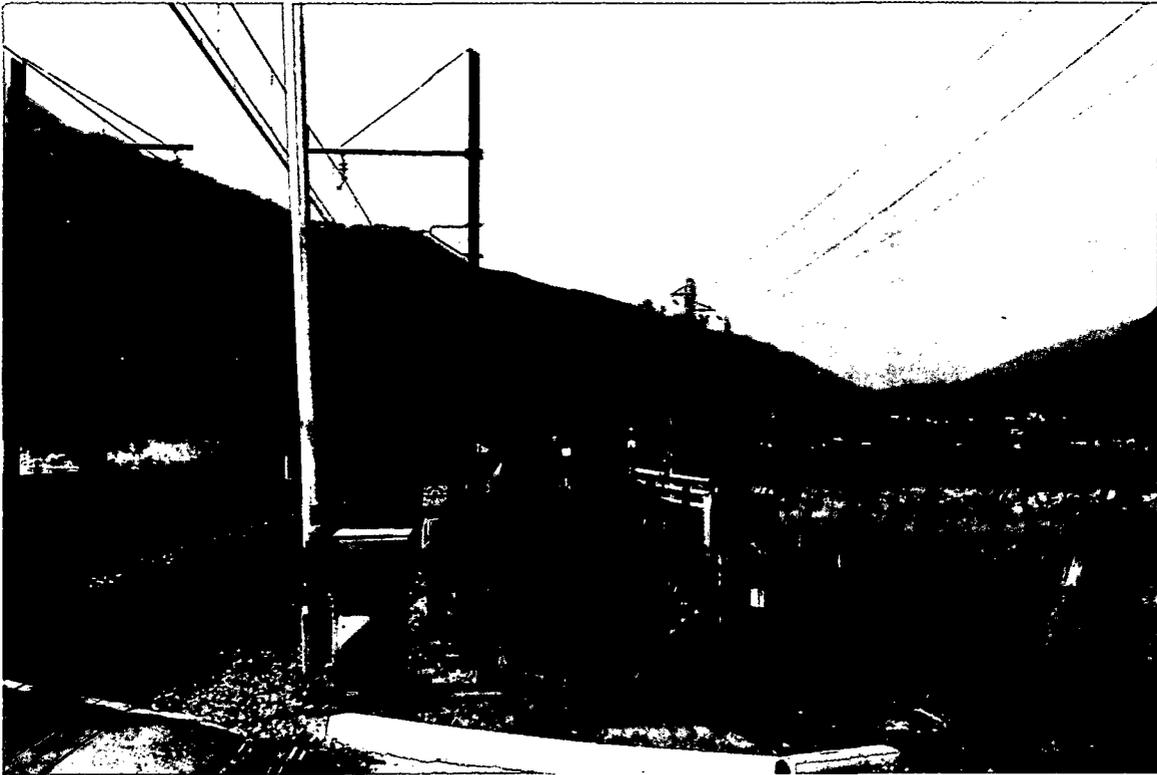
SNCF FS NOVEMBRE 1992



SCHEMA SIMPLIFIE DES INSTALLATIONS EXISTANTES ENTRE CHAMBERY ET MODANE EXCLUS



PROFIL EN LONG SCHEMATIQUE DE LA LIGNE EXISTANTE ENTRE MONTMELIAN ET MODANE



LA LIGNE DE MAURIENNE AU SUD DE St-REMY-DE-MAURIENNE



VALLEE DE LA MAURIENNE AU DESSUS DE St-JEAN-DE-MAURIENNE: LE PAS-DU-ROC

La gare de Saint-Jean-de-Maurienne joue un rôle de gare de relais dans le sens France - Italie pour :

- le stationnement des trains en attente d'acceptation par les F.S. ;
- l'adjonction de moyens de traction (mise en place de machine de pousse).

La gare de Saint-Avre, télécommandée depuis Saint-Jean-de-Maurienne, permet le stationnement :

- de trains en attente d'acceptation dans le sens France - Italie ;
- dans le sens Italie - France en cas de difficultés d'écoulement sur le réseau S.N.C.F.

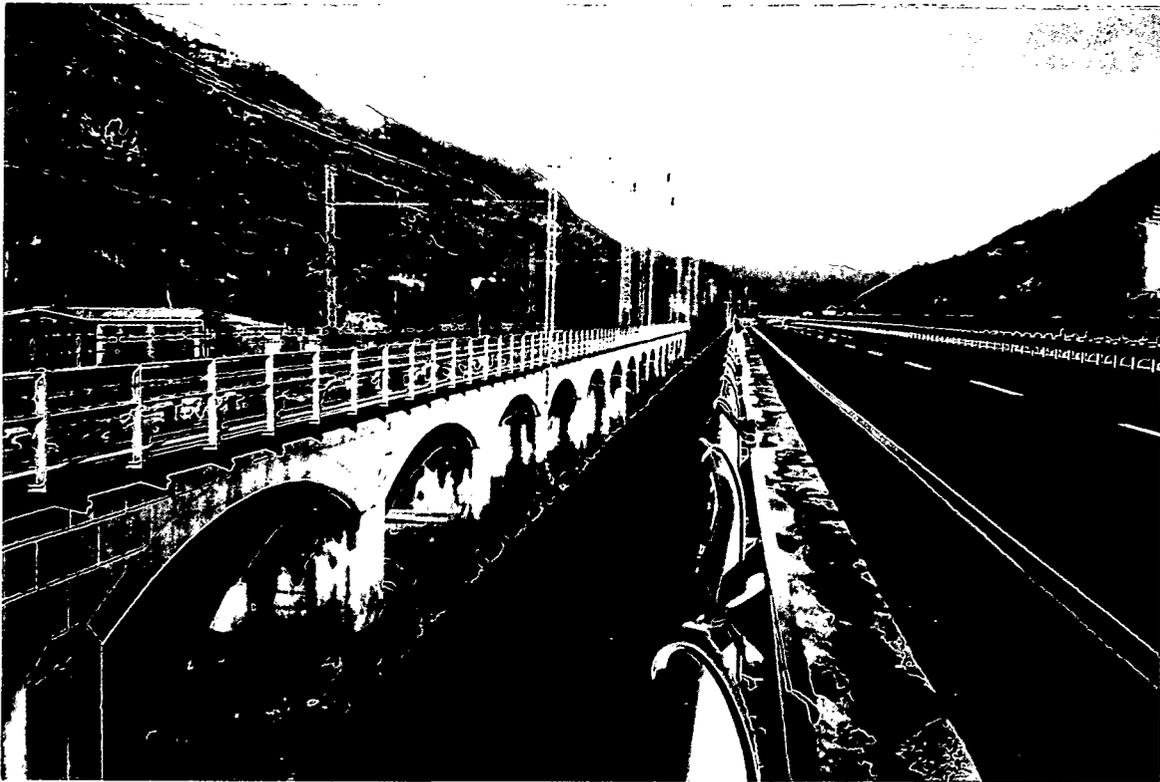
La gare commune de Modane est une gare d'échange de moyens de traction du fait des tensions d'alimentation différentes : 3000 volts et 1500 volts. Les locomotives F.S. circulent toutefois en gare de Modane sous la caténaire S.N.C.F. 1500 volts.

La gare de Modane est en outre le siège des opérations suivantes :

- douane et contrôle phytosanitaire ;
- visites techniques S.N.C.F. et F.S.
- constitution des trains selon les réglementations S.N.C.F. ou F.S.

Le débit journalier moyen y compris les machines haut le pied a été en 1991 pour les deux sens de :

- de Chambéry à Montmélian : 147 circulations/jour ✓
- de Montmélian à St-Pierre-d'Albigny : 112 circulations/jour
- de St-Pierre d'Albigny à St-Jean-de-Maurienne : 87 circulations/jour
- de St-Jean-de-Maurienne à Modane : 99 circulations/jour



LIGNE EXISTANTE ENTRE MODANE ET BUSSOLENO, ENVIRONS DE SALBERTRAND



LIGNE EXISTANTE. INSTALLATIONS DE BUSSOLENO

De Modane à Turin

La longueur de la ligne actuelle est de 102,3 km de Modane à Turin. Elle est à double voie et électrifiée en 3000 volts courant continu. A Bussoleno, il y a une bifurcation vers Susa, longue de 7,5 km, à simple voie, électrifiée en 3000 volts continu également.

L'espacement des trains est assuré par un bloc électrique manuel, mais l'installation d'un bloc automatique semblable à celui déjà réalisé sur les sections Modane - Bardonecchia, Salbertrand - Bussoleno et Collegno - Turin, s'achève actuellement.

La ligne est exploitée depuis le Poste de Commandement de Turin Porta Nuova afin d'améliorer la régularité de la circulation.

La vitesse maximale de la ligne varie entre 85 et 155 km/h pour les trains de voyageurs, et 80 et 100 km/h pour les trains de fret.

La section Modane - Turin est caractérisée par :

- l'existence du tunnel du Fréjus de 13,7 km de longueur, et quatre tunnels à dégager au gabarit B entre les gares de Bardonecchia et de Salbertrand ;
- de fortes déclivités (atteignant fréquemment 30 °/° entre Modane et Bussoleno) ;
- la nécessité de traction double ou triple dans le sens Italie - France, et de locomotives de pousse dans le tunnel du Fréjus.

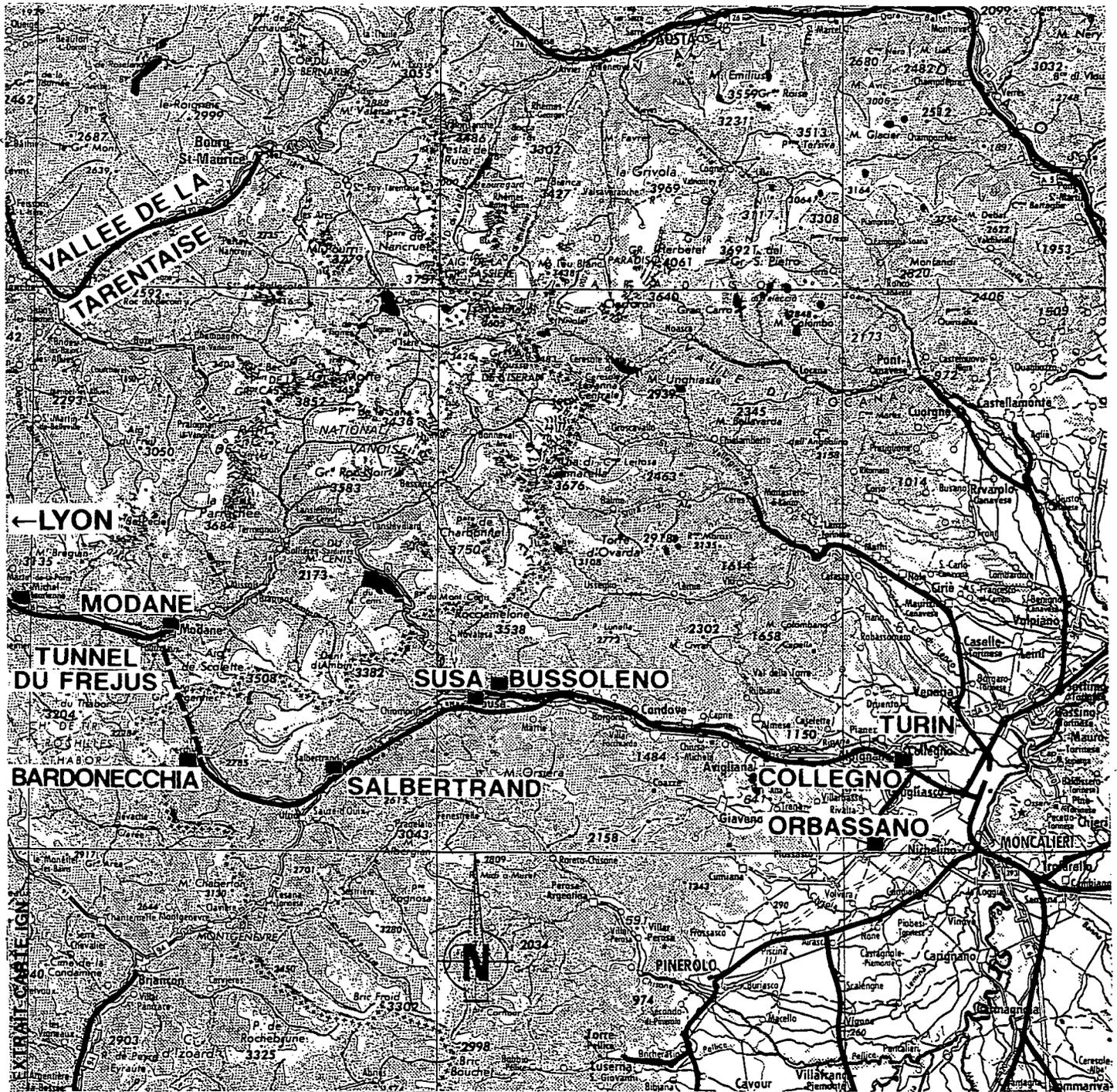
Sur cette ligne, les principales gares sont :

- Bussoleno en raison de la présence d'un dépôt pour les éventuels renforts traction des trains de fret, et du trafic local voyageurs en provenance de la ligne de Susa ;
- Bardonecchia pour le trafic voyageurs et le terminus des trains régionaux ;
- Turin - Orbassano, triage marchandises et gare Fret publique.

En cas de difficultés d'exploitation, la rétention des trains de Fret se fait essentiellement aux gares de Bussoleno et Salbertrand.

Le débit journalier moyen, y compris les machines haut le pied a été en 1991 pour les deux sens de :

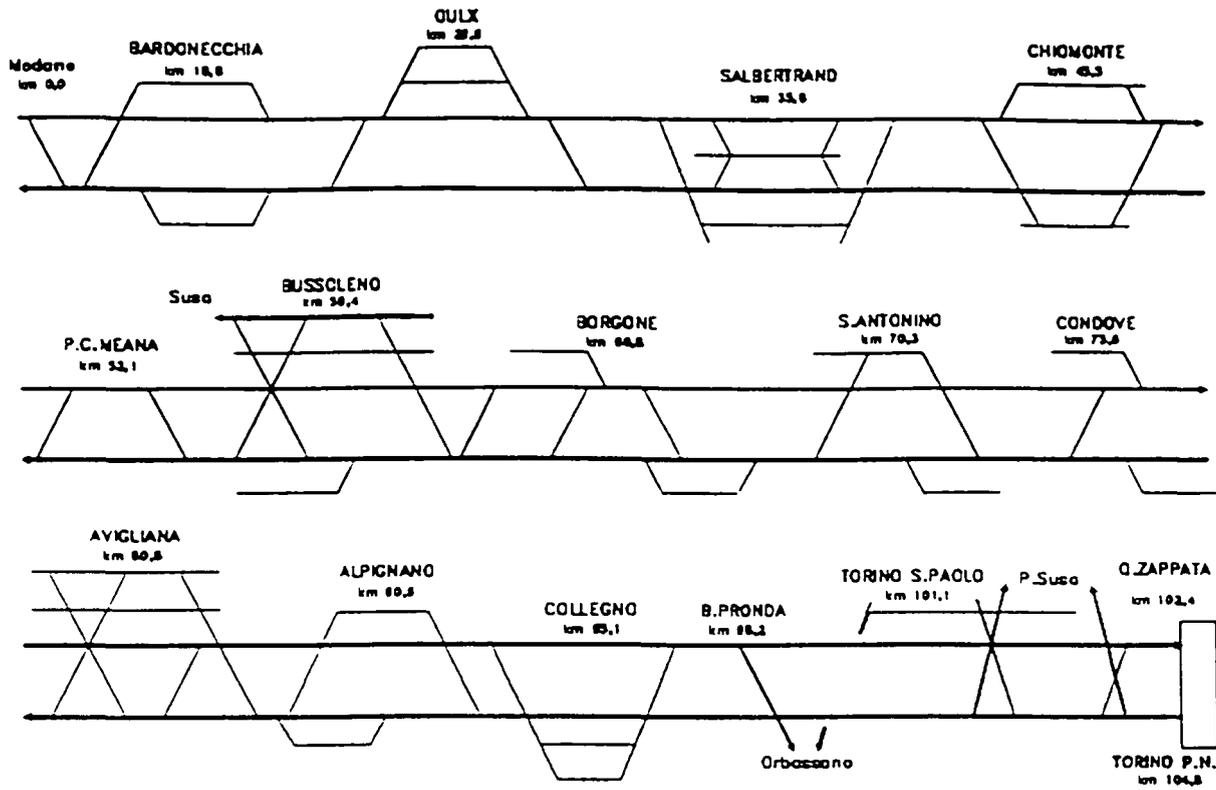
- de Modane à Bardonecchia : 101 circulations/jour
- de Bardonecchia à Bussoleno : 95 circulations/jour
- de Bussoleno à Turin : 154 circulations/jour



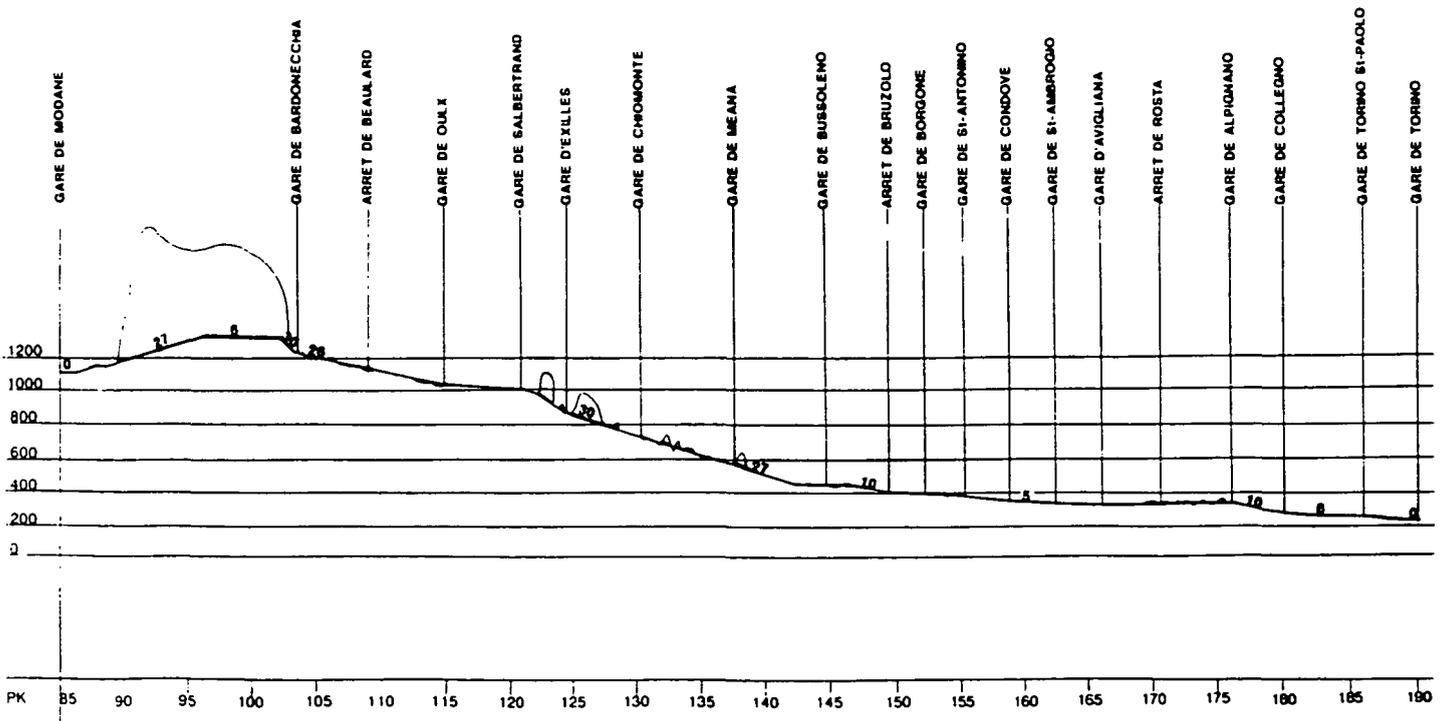
NOUVELLE LIAISON FERROVIAIRE LYON-TURIN
COTE ITALIEN
SITUATION ACTUELLE

0 km 10 km 20 km 30 km 40 km

SNCF FS NOVEMBRE 1992



SCHEMA SIMPLIFIE DES INSTALLATIONS EXISTANTES ENTRE MODANE ET TURIN



PROFIL EN LONG SCHEMATIQUE DE LA LIGNE EXISTANTE ENTRE MODANE ET TURIN



III - LE TUNNEL DE BASE SOUS LE MONT D'AMBIN DESCRIPTION GENERALE DE L'OUVRAGE

Le choix d'un tunnel de base de 54 km de longueur entre Saint Jean-de-Maurienne et Susa, pour le projet de liaison transalpine, est le résultat d'une étude comparative menée en 1988 et 1989 avec les solutions suivantes :

Solution 1 : Réutilisation du tunnel ferroviaire actuel du Fréjus, long de 14 km (raccordement côté français à l'ancienne galerie de visée) :

Les rampes dans le tunnel actuel atteignent 23 ‰ côté français, 30 ‰ côté italien.

La ligne nouvelle d'accès côté français comportait des rampes de 26 ‰ depuis Saint Jean-de-Maurienne, et plus de 12 km de tunnels de versant ou de pied de versant à la faisabilité incertaine.

La ligne nouvelle d'accès côté italien, en rampe de 26 ‰ également, devait être réalisée essentiellement en tunnel.

Solution 2 : Réalisation d'un tunnel de 35 km de longueur de la Praz à Susa :

La ligne nouvelle d'accès côté français comportait des rampes de 20 à 25 ‰ depuis Saint Jean-de-Maurienne, et 10 km de tunnels de pied de versant à la faisabilité incertaine.

La rampe moyenne dans le tunnel entre Modane et Susa aurait été de l'ordre de 15 ‰.

Il est apparu que ces solutions, si elles permettaient un tunnel principal de plus faible longueur que le tunnel de base de Saint-Jean-de-Maurienne à Susa, présentaient par ailleurs de graves inconvénients :

- Pour le fret :
 - la première solution, si elle était satisfaisante pour le trafic à grande vitesse, ne permettait pas de disposer d'un gabarit suffisant (le tunnel actuel ne dégage que le gabarit A) pour répondre aux besoins du marché du fret (gabarit B+ ou C) et la modification, en exploitation, du gabarit d'un tunnel d'une telle longueur (14 km) posait des problèmes redoutables d'exploitation impliquant des détournements d'itinéraires et présentant des risques importants de pertes de marché ;

- la seconde solution ne présentant que de faibles différences de profil par rapport à la ligne actuelle (rampes atteignant 25 °/°° contre 30 °/°° pour la ligne existante) ne permettait pas d'augmenter la capacité unitaire des trains de marchandises et leur compétitivité par rapport au transport routier, excluant donc des transferts de trafic entre la roue et le rail. En outre, des rampes aussi fortes s'avèreraient incompatibles avec l'exploitation d'une autoroute ferroviaire ;

● Les 2 solutions posaient le difficile problème de l'insertion des lignes d'accès aux tunnels courts, dans les hautes vallées étroites, déjà très densément occupées par des infrastructures : routes, voie ferrée existante, autoroute (en cours de réalisation), pour autant que cette insertion soit encore possible et acceptable du point de vue de l'environnement.

● La présence sur les lignes d'accès de nombreux tunnels de versant ou de pied de versant techniquement très difficiles à réaliser et d'un coût élevé, conduisait finalement les solutions tunnels courts + lignes d'accès à un montant global d'investissement d'un ordre de grandeur peu différent de celui du tunnel de base.

● Enfin, construites dans des zones difficiles, les futures lignes d'accès étaient exposées, comme la ligne actuelle interceptée plusieurs fois par an, à des coulées de boues, des avalanches ou des chutes de bloc interférant à la fois sur la sécurité des circulations (surtout à grande vitesse) et sur la qualité de l'exploitation.

En résumé, il n'apparaissait pas justifié de consentir un investissement aussi important qui ne levait pas :

- soit les contraintes gabarit (solution 1)
- soit les contraintes d'exploitation (maintien de la capacité unitaire des trains actuels puisque les contraintes de pente subsistaient sur les nouvelles lignes d'accès : solutions 1 et 2)

et qui posait de redoutables problèmes d'insertion de ces lignes d'accès dans l'environnement des hautes vallées alpines.

C'est ainsi que le groupe de travail a été conduit à préconiser un tunnel de base, seule solution à permettre un saut qualitatif dans l'offre de transport pour le fret, réservant la possibilité de l'autoroute ferroviaire et préservant l'environnement des hautes vallées.

Les prises de décision des gouvernements français et italien à Viterbo (17/18 octobre 1991) et à Paris (10 novembre 1992), visant à développer au maximum le transport combiné (par conteneurs) et l'autoroute ferroviaire (où les camions sont placés sur les trains), ne peuvent que renforcer les options prises.

L'ouvrage projeté (54 km) relie Saint-Jean-de-Maurienne à Susa, distantes de 57 km.

Ce tunnel serait :

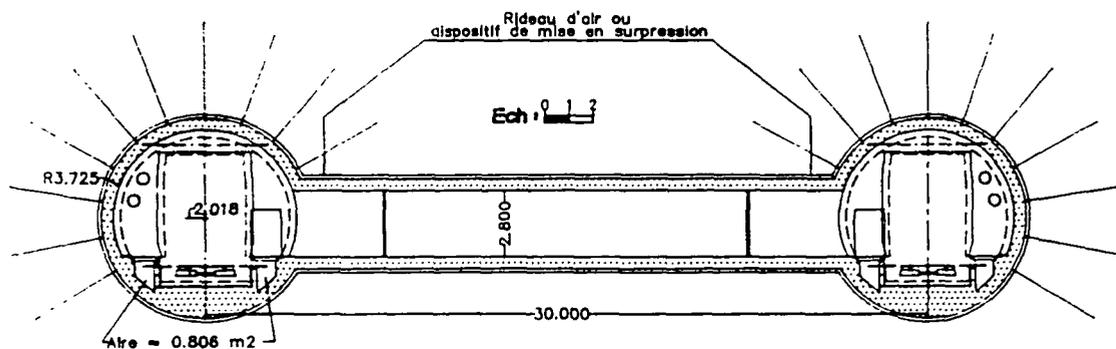
- un ouvrage bitube

La solution bitube s'impose en regard d'une solution monotube car elle favorise :

- la prévention et la limitation de la gravité des incidents possibles (sécurité active) ;
- l'atténuation des conséquences d'un incident (sécurité passive) ;
- les conditions de réalisation :
 - . fronts de taille plus réduits, et par là possibilité d'utiliser des tunneliers avec une réduction prévisible des délais, et, en conséquence, des coûts (financements compris) ;
 - . la solution bitube limite les effets de convergence des terrains sous forte couverture et limite les difficultés de réalisation (en particulier un des tubes sert de galerie de reconnaissance à l'autre).

On notera en particulier :

- que l'étude BERGER pour la liaison du Brenner propose des tubes à voie unique dans son rapport d'avril 1991 pour des raisons économiques et de sécurité ;
- que l'U.I.C., Commission "Installations Fixes", recommande cette solution pour des raisons de sécurité dans le rapport IF 4/91 de juin 1991.



COUPE EN TRAVERS AU DROIT D'UN RAMEAU DE LIAISON

- sans galerie de service...

La réalisation d'une galerie de service, dimensionnée pour l'accès des moyens de secours et d'évacuation, implique un surcoût important si elle ne doit pas être réalisée pour d'autres motifs (galerie de reconnaissance, ventilation, accès chantier...).

C'est pour cette raison que la présente étude a porté sur un "système de sécurité" sans galerie de service en considérant, à la suite de recherches bibliographiques, que le but est de limiter les risques et également de favoriser la mise "en lieu sûr" des passagers.

Il en est résulté qu'il est possible de satisfaire de telles exigences sans galerie de service dans la mesure où une gare accessible aux moyens de secours et équipée pour l'évacuation des voyageurs permet de réduire à moins de 30 km la problématique d'un tunnel de 54 km.

Une telle considération est proche de ce qui a prévalu pour les tunnels du réseau Shinkansen au Japon : tunnel du SEIKAN (54 km) mais aussi tunnels d'IWATE et de DAISHIMIZO (20 à 30 km). Le groupe de travail va se faire préciser dans les prochains mois les dispositions retenues.

De même il semble que la nécessité d'une galerie de service soit remise en cause dans le cadre des autres projets de tunnels alpins. Des contacts avec les réseaux correspondants permettront de suivre l'évolution de la doctrine en la matière.

En outre, la présence de la gare intermédiaire pour l'évolution des trains de travaux et, en fonction des besoins, des interceptions de circulation programmées (blancs travaux), ne rendent pas une galerie de service nécessaire pour les besoins de l'entretien.

- avec des rameaux de liaison entre les deux tubes...

Dans le système proposé, basé sur une solution bitube, chaque tube sert de galerie d'évacuation à l'autre grâce aux rameaux de liaison normalement fermés automatiquement. Leur ouverture est conditionnée par des mesures d'exploitation appropriées.

Chaque rameau de communication a une longueur utile de 20 mètres (entre portes) et une largeur de 3 mètres.

Afin d'établir les estimations de coûts, l'espacement retenu entre les rameaux a été de 350 mètres, sachant qu'il devra être précisé ultérieurement sur la base des temps nécessaires à l'évacuation d'une rame et à la mise en lieu sûr des passagers en cas d'incident.

En outre un trottoir latéral d'une largeur de 1,20 mètres, comprenant des caniveaux pour les passages de cables et canalisations, a été prévu dans chaque tube.

- sans rameaux de pistonnement...

Sur la base des études conduites jusqu'à présent, l'utilisation de rameaux de pistonnement ne présente pas d'intérêt, que ce soit sous l'angle technique ou économique, et présente des inconvénients secondaires difficilement quantifiables pour le renouvellement d'air (circulation de l'air en boucles fermées), le confort (effets aérodynamiques dans l'autre tube) et la sécurité (effets sur les chargements fret dans l'autre tube par exemple).

- parcouru par les rames voyageurs à la vitesse de 220 km/h...

Du fait de la mixité des trafics fret et voyageurs, et dans le souci de dégager une forte capacité du tunnel, les études ont été conduites dans l'hypothèse d'une vitesse des trains de voyageurs limitée à 220 km/h, le tracé du tunnel réservant néanmoins la possibilité de vitesses nettement supérieures.

- avec des rampes maximales de 12 ‰...

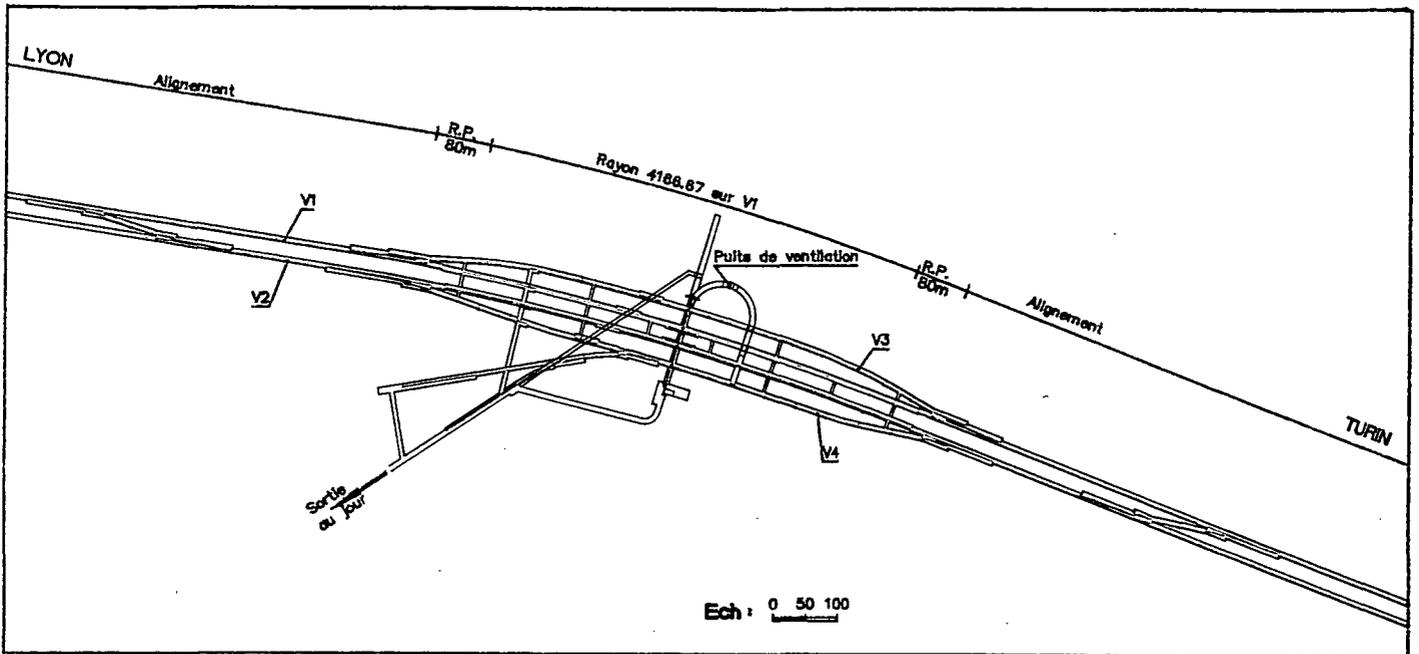
La valeur maximale des pentes longitudinales en tunnel est de 12 ‰. Une telle valeur limite la couverture des terrains à 300 mètres dans le secteur de Modane tout en permettant la traction des trains de Fret de 1600 T par une seule locomotive à 6 essieux. Les études ultérieures devront évaluer l'intérêt de diminuer cette valeur en vue d'améliorer le débit de l'ouvrage.

- avec une gare de service souterraine au droit de Modane...

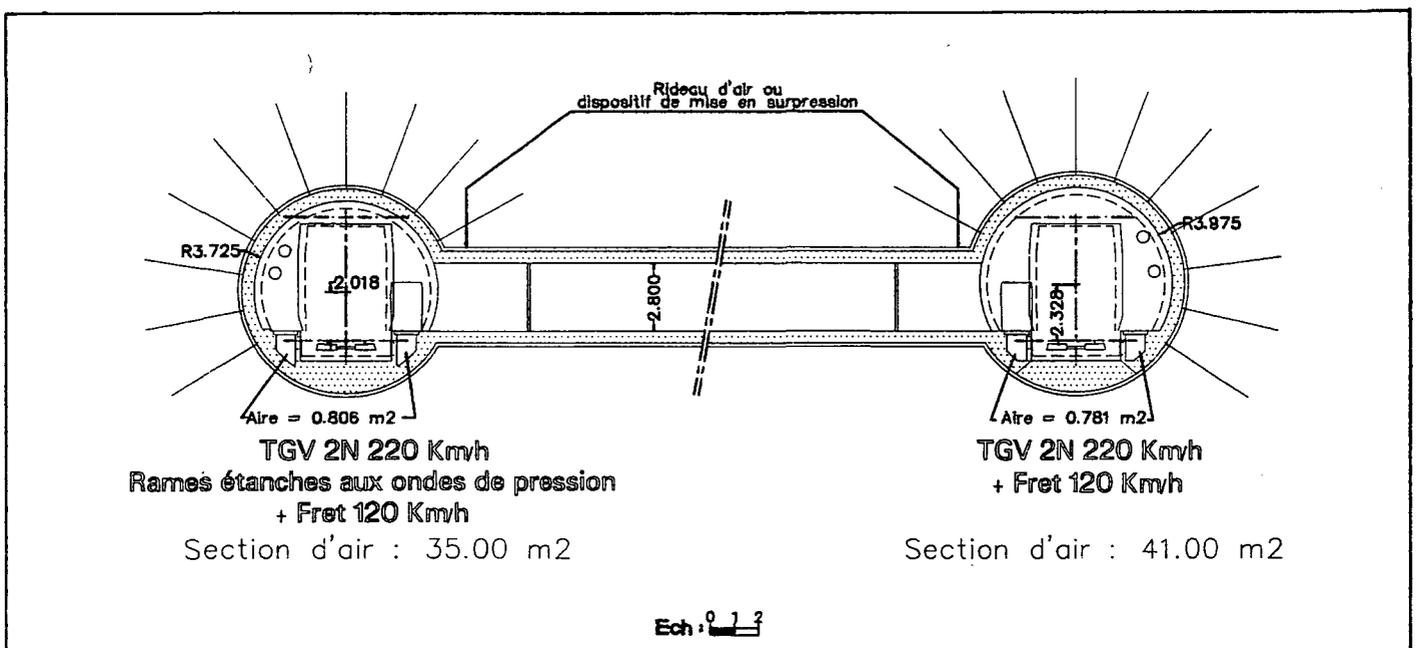
Les études bibliographiques et les réflexions engagées ont permis de proposer un système visant à permettre la mise en lieu sûr des voyageurs dans des temps acceptables.

La topographie et le profil en long du tunnel, en V renversé, font que le point haut du tunnel est assez près de la surface ; on a donc pu ainsi prévoir sous Modane un accès intermédiaire et des installations souterraines aptes à l'accueil d'un train où une avarie aurait été détectée, et en particulier un début d'incident à bord, et à la mise à l'abri des voyageurs, afin de limiter les risques d'immobilisation dans le tunnel et de diminuer les temps d'accès à un lieu sûr (15 minutes à la vitesse de 120 km/h - correspondant à une marche dégradée - pour rejoindre l'extérieur ou la gare de service souterraine équipée pour l'évacuation des usagers et les interventions de secours).

La gare de service sous Modane est le point clef de la proposition.



VUE EN PLAN SCHEMATIQUE DE LA GARE DE SERVICE DE MODANE, HYPOTHESE DE TRACE NORD



COUPE EN TRAVERS AU DROIT D'UN RAMEAU DE LIAISON

Elle a des fonctions essentiellement de secours et permet :

- l'arrêt d'un train sujet à un début d'incendie à bord avec une meilleure protection qu'en cas d'arrêt en tunnel ;
- l'évacuation du train et la mise à l'abri des voyageurs dans des "lieux sûrs" avant de gagner l'extérieur ;
- l'extinction d'un incendie à bord.

Au cas où, après un incendie, le train s'arrêterait en tunnel loin des têtes et ne pourrait plus poursuivre sa route, la gare de service intermédiaire permettrait de réduire les temps d'intervention des secours extérieurs.

De plus la gare de service de Modane, dotée d'une voie d'évitement par sens et de communications de changement de voie, apporte une amélioration de la capacité du tunnel de l'ordre de 20 % et une plus grande souplesse d'exploitation, et offre ainsi une garantie de régularité.

Elle permet enfin l'acheminement des trains travaux pour la maintenance voie et caténaire en rationalisant l'intervalle de temps à disposition.

Les voies d'évitement protégées contre les fumées pour chaque sens de circulation et les deux communications pair-impair supposent l'exécution d'ouvrages souterrains importants et en particulier un puits de désenfumage vertical de 300 m de profondeur.

Il est prévu par ailleurs une voie de garage pour un train de travaux et une autre pour un train de premier secours au pied de la descenderie d'accès.

- avec une section libre d'air de 35 ou 41 m²...

Les premières études de résistance à l'avancement et d'effets aérodynamiques dans l'hypothèse bitube ont confirmé que les ordres de grandeur des sections prises en compte dans l'avant-projet de juin 1991 étaient a priori acceptables au regard de la motorisation des trains, du confort des voyageurs des rames à grande vitesse existantes et des convois Fret classiques.

Les études ont été concentrées sur une vitesse voyageurs de 220 km/h.

Deux hypothèses ont été prises en considération :

- circulation de rames à grande vitesse étanches aux ondes de pression ou légèrement pressurisées à V220 km/h et trains de fret, gabarit C, à V120 km/h, avec une section libre d'air de 35 m² ;
- circulation des rames à grande vitesse non étanches à V220 km/h et trains de marchandises, gabarit C, à V120 km/h, avec une section libre d'air de 41 m².

Les sections prévues sont de type circulaire essentiellement pour deux motifs :

- pour un projet d'une telle ampleur, il pourra être envisagé d'adopter la mécanisation des travaux d'excavation pour une grande longueur du tunnel ;
- la forme circulaire est la mieux adaptée aux sollicitations attendues (orientations diverses et inconnues des contraintes principales à l'intérieur du massif) et aux concentrations d'efforts sous forte couverture.

- avec les équipements suivants :

● Ventilation et désenfumage.

Il ressort des études menées jusqu'à présent qu'une installation spécifique de renouvellement d'air dans le tunnel n'est pas nécessaire en période d'exploitation du fait que l'effet "piston" provoqué par le transit des trains est suffisant pour faire circuler l'air naturellement.

Il s'avère nécessaire en revanche, pour des raisons de sécurité, de prévoir un système d'extraction des fumées devant répondre aux exigences suivantes :

- éloigner les fumées en cas de sinistre ;
- assurer le renouvellement de l'air durant les périodes d'entretien, hors circulation normale des trains.

L'installation comprendrait 5 centrales de ventilation :

- une pour les besoins de la gare de Modane ;
- quatre en position intermédiaire.

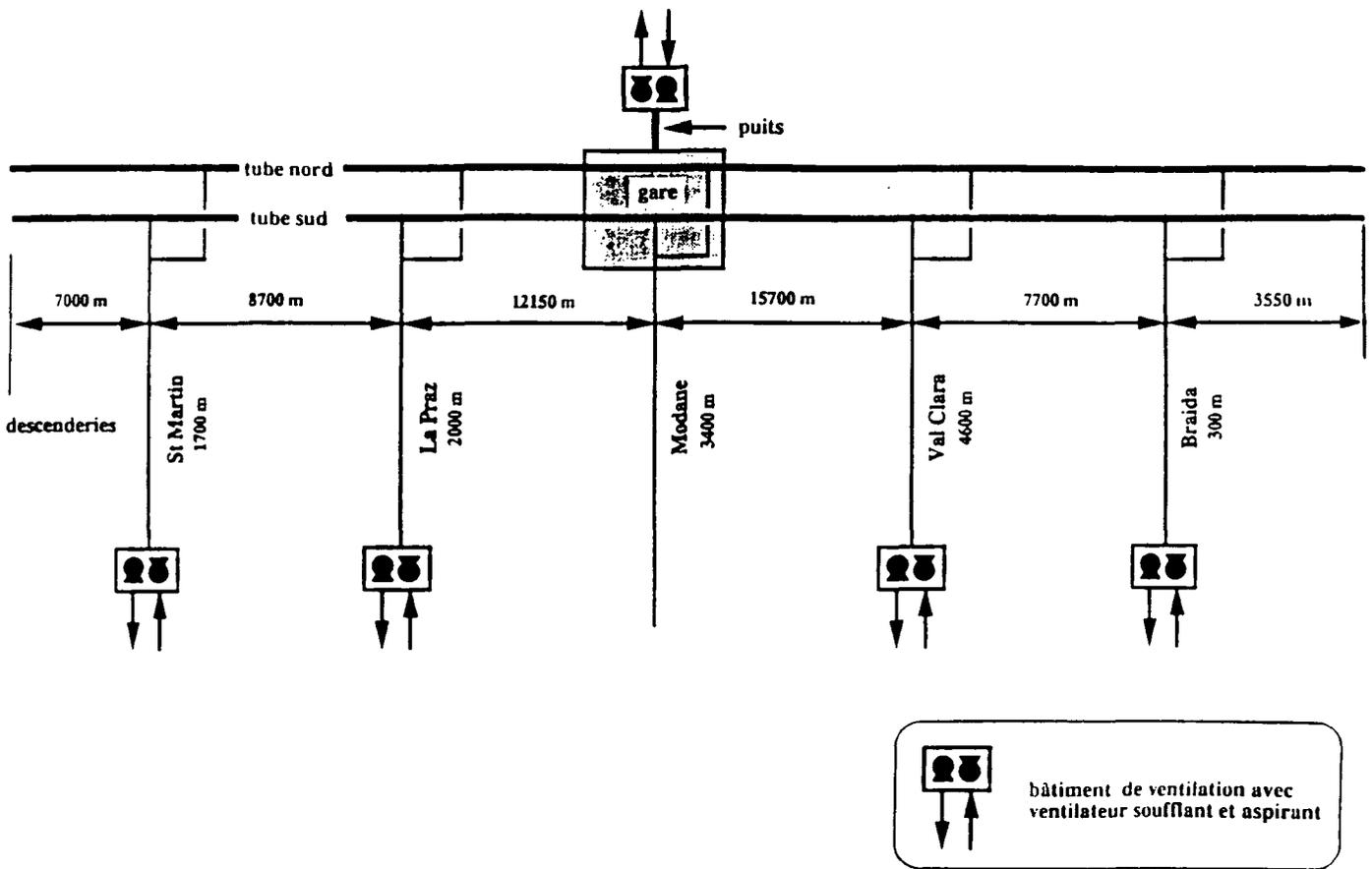
Les flux d'air nécessitant des conduits ou galeries de grande section, il est prévu d'utiliser les descenderies qui auront servi à la construction de l'ouvrage principal. Pour la gare de Modane, un puits devra être réalisé.

Les centrales de ventilation seront équipées de ventilateurs réversibles pour permettre d'insuffler ou d'extraire l'air, ainsi que de vannes permettant de distribuer les flux dans un tube ou dans l'autre.

En outre des ventilateurs indépendants permettront de mettre en surpression les rameaux de liaison entre tubes.

Des études plus approfondies seront engagées dès que la localisation des descenderies et la géométrie finale des ouvrages principaux seront définies, en vue de fixer les caractéristiques générales de l'installation.

Il n'a été établi pour l'instant qu'un schéma général sur la base des descenderies prévues.



SCHEMA DES INSTALLATIONS DE DESENFUMAGE DU TUNNEL DE BASE

● Refroidissement

La température prévisible dans la roche (pouvant dépasser 40°C) et l'échauffement dû à la circulation des trains ont amené à prévoir une installation de refroidissement.

Le système prévu est un bitube à eau froide en épingles.

Dans la configuration de base, et pour une température de consigne de 25°C, le diamètre maximal de chaque tube est de 457 mm dans la zone la plus chaude du tunnel.

- avec des équipements ferroviaires restant à préciser...

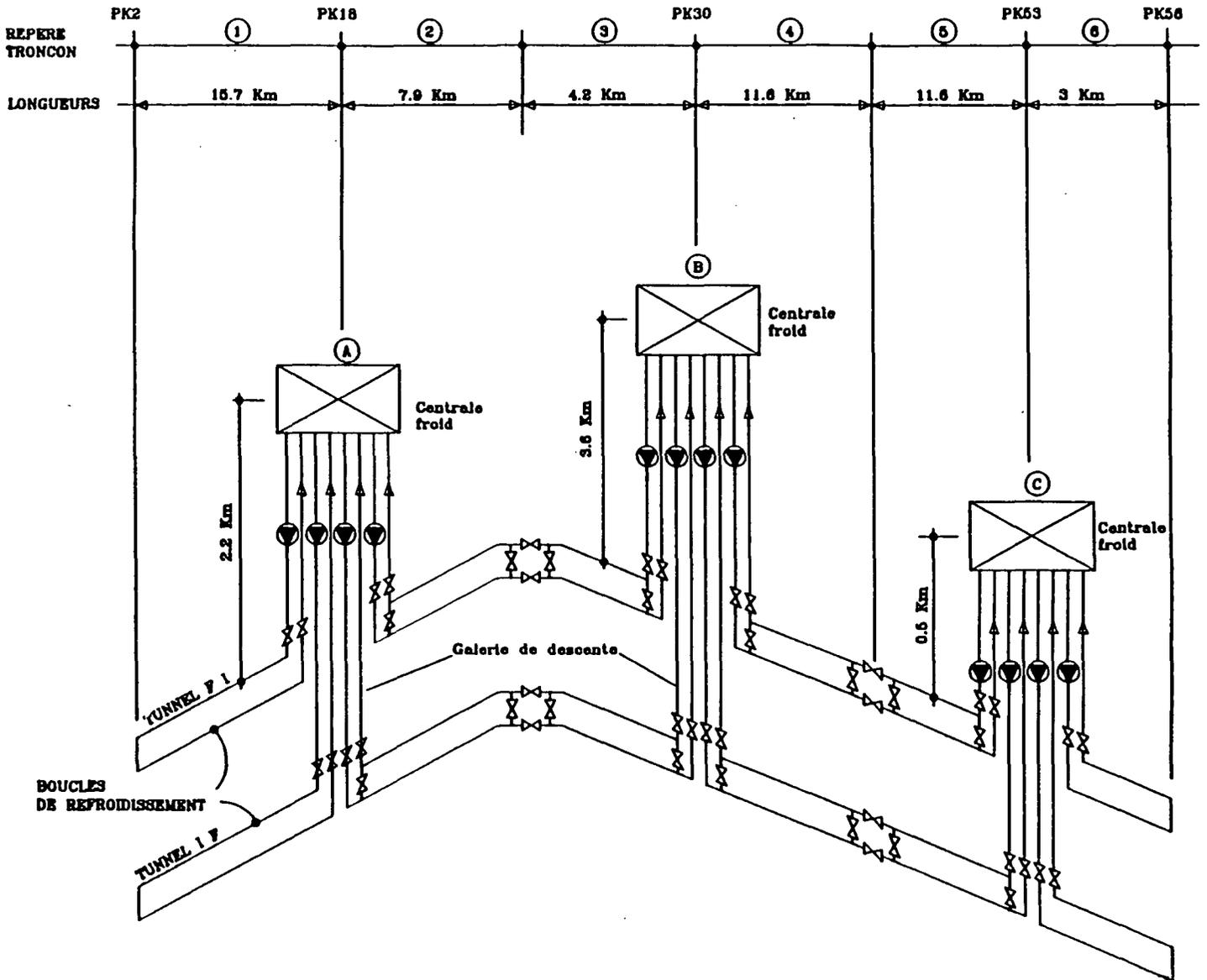
L'Italie et la France ayant opté pour une électrification en courant alternatif 25000 volts pour leurs réseaux à grande vitesse, c'est ce type d'électrification qui sera retenu dans le tunnel de base.

Si les économies d'entretien d'une voie posée sur dalle sont indéniables, le choix devra prendre en compte :

- le surcoût d'un tel type de pose ;
- les conséquences prévisibles en matière de bruit, de vibrations, d'amortissement des ondes de pression... ;
- la capacité de l'armement à accepter des mouvements différentiels dans les terrains encaissants.

La signalisation sera basée sur une transmission voie machine. Les installations au sol assureront une fonction de supervision du trafic, élaboreront et transmettront dans la voie des informations de signalisation (vitesse-limite, vitesse-but, distance-but,...).

Les équipements de bord décoderont et traiteront ces informations pour les visualiser au conducteur et assurer un contrôle de vitesse.



SCHEMA DES INSTALLATIONS DE REFOIDISSEMENT DU TUNNEL DE BASE

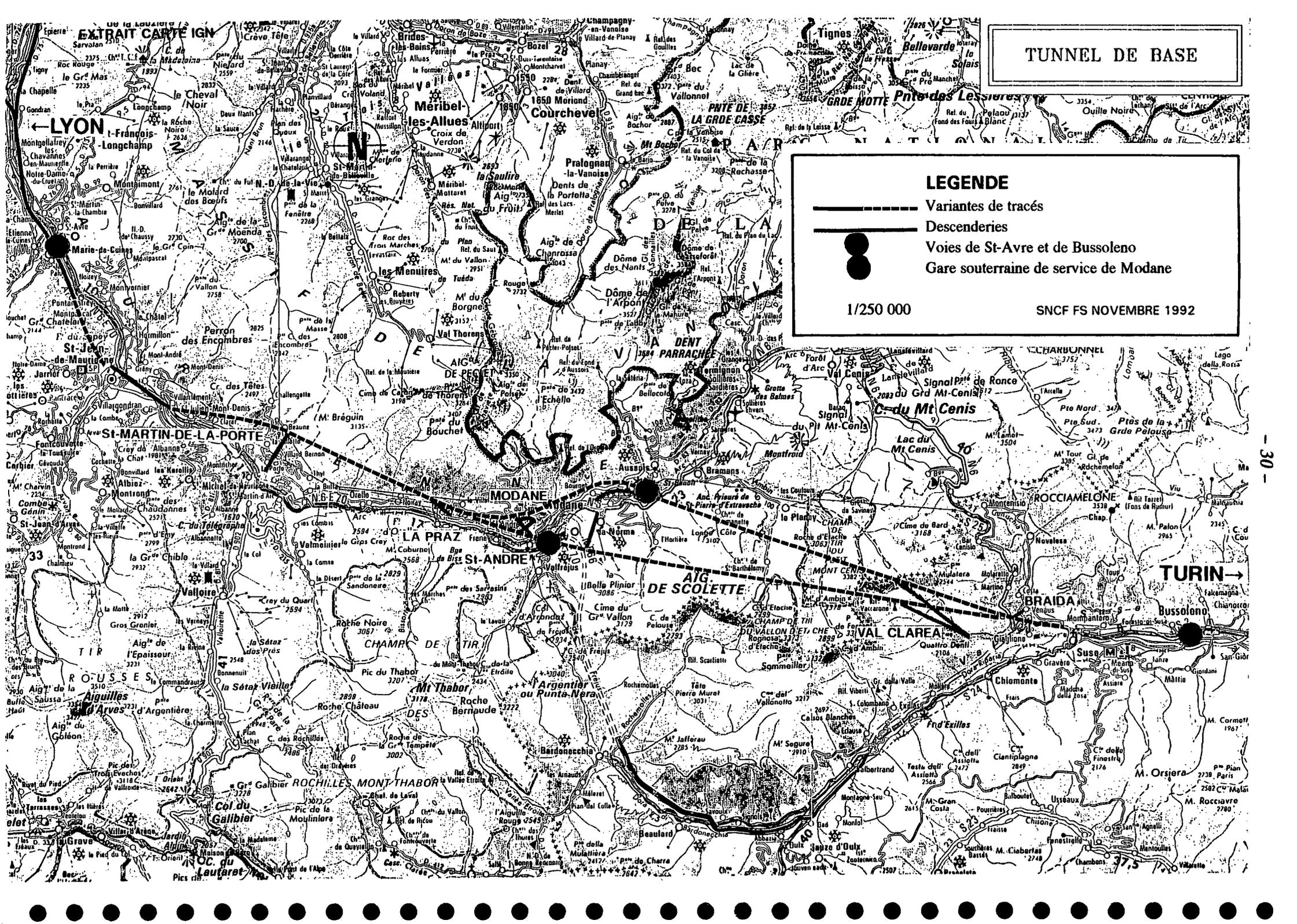
TUNNEL DE BASE

LEGENDE

- Variantes de tracés
- Descenderies
- Voies de St-Avre et de Bussoleno
- Gare souterraine de service de Modane

1/250 000

SNCF FS NOVEMBRE 1992



- selon deux tracés possibles

L'orientation générale du projet est Ouest-Est, perpendiculaire aux grands accidents géologiques

Deux tracés (Nord et Sud) ont été examinés ; ils se différencient dans le tronçon est du projet, entre La Praz et Susa.

Le tracé nord est le plus favorable en l'état actuel des connaissances.

Côté français, ce tracé traverse les installations de la gare de Saint-Jean-de-Maurienne et, après 2 km environ, s'engage dans le tunnel de base sous une couverture maximale de 300 mètres au droit de Saint-Martin-de-la-Porte où est prévue au km 7,000 depuis la tête du tunnel la première descenderie de 1900 mètres de longueur.

Le tracé se maintient en alignement sur environ 15 km et, au droit du bourg de la Praz évite, par une courbe de rayon 6000 mètres d'intercepter des terrains de qualité géotechnique médiocre et cherche à offrir des conditions de réalisation plus favorables pour la gare de service de Modane.

Au km 15,700 est envisagée la deuxième descenderie d'une longueur de 2000 mètres.

Au km 28,000 sont situées la gare de service souterraine de Modane et la descenderie d'une longueur de 3900 mètres.

Le tracé continue en alignement jusqu'au km 40,500 où se situe une courbe de rayon 10000 mètres, la couverture atteignant la valeur maximale de 2200 mètres.

Au km 43,700 est prévue la descenderie de Val Clarea, d'une longueur de 4900 mètres.

Le tronçon en territoire italien reste, selon le tracé nord, en alignement sur 6 km environ, puis, par 2 courbes de grands rayons, ressort à l'air libre 500 mètres au nord des installations ferroviaires actuelles de Susa.

A 3,5 km de la tête côté Sud est prévue, sur la localité de Braida, la première descenderie d'attaque côté italien longue de 300 mètres seulement.

La pente longitudinale du tunnel, de 12 °/°, s'inverse à proximité de la gare de Modane. L'ouvrage ne comporte donc pas de point bas, ce qui permettra d'éviter d'importantes stations de relevage des eaux.



IV - LA SECURITE DANS LE TUNNEL DE BASE : UNE SOLUTION BITUBE, SANS GALERIE DE SERVICE, AVEC GARE INTER-MEDIAIRE A MODANE

Une recherche bibliographique sur les incendies en tunnel et une analyse de projets récents en cours d'étude ou déjà réalisés ont été effectuées.

Ces recherches font l'objet de l'annexe 2.

Elles ont permis en particulier de conclure que :

- dans une galerie de longueur notable, une organisation efficace et aussi simple que possible de l'auto-secours (du fait que, même en situation favorable, le temps de mise en route des secours extérieurs est inévitablement long) revêt une importance particulière ; en cas d'incendie, la rapidité et l'efficacité des dispositions prévues pour mettre les passagers en lieu sûr dépendent en grande partie des mesures qui seront prises pour l'auto-secours ;
- on doit absolument, dans toute la mesure du possible, éviter de laisser un train en feu arrêté en galerie ; le train doit poursuivre sa route jusqu'à rejoindre l'extérieur ou un lieu équipé pour l'évacuation des passagers et l'extinction de l'incendie.

Par ailleurs en dehors des aspects particuliers de l'incendie, il a été examiné également les autres possibilités d'accidents, notamment ceux ayant pour cause des défaillances mécaniques ou d'exploitation.

L'ensemble des propositions du sous-groupe Sécurité, résumées ci-après, font l'objet de l'annexe 3.

LES GRANDS PRINCIPES

Les principes ci-après ont été retenus pour l'élaboration de la solution proposée :

- réduire les probabilités d'accident en tunnel ;
- limiter les causes d'incendies sur les trains de voyageurs en particulier ;
- réduire la longueur des tronçons de tunnel entre extérieur et/ou gare de secours pour favoriser l'évacuation d'un train accidenté vers un lieu sûr ;
- réduire les conséquences d'un accident en tunnel ;
- éviter le croisement des trains ;
- favoriser l'auto-secours et l'évacuation ;
- favoriser l'accès des secours ;
- envisager les scénarios d'accident ou d'incendie pour en dégager des procédures d'exploitation et d'intervention fiables.

LES DIFFERENTES SOLUTIONS POSSIBLES

Le choix de la solution à retenir pour un tunnel de plus de 50 km de longueur s'est posé entre :

- La solution monotube avec galerie de service

Elle n'est pas apparue pertinente tant en ce qui concerne les risques de collision ou de cohabitation d'un train sinistré avec un train "sain" qu'en ce qui concerne l'évacuation des voyageurs. En effet, pour gagner la galerie de service depuis la voie opposée, il faut réaliser des galeries de liaison par dessus ou par dessous le tube principal.

En outre la présence des trains circulant en sens opposé rend plus difficile le contrôle de la ventilation et du désenfumage.

- La solution bitube

Cette solution fait l'objet de trois variantes :

● solution bitube avec galerie de service

Elle a l'inconvénient de laisser la longueur de parcours en tunnel égale à 54 km, ce qui augmente en cas de sinistre les probabilités d'intervention et d'évacuation en tunnel.

● solution bitube sans galerie de service

Elle présente les mêmes inconvénients que la solution avec galerie de service et de plus rend l'organisation du secours plus difficile car il faut utiliser depuis les têtes du tunnel le 2ème tube pour porter secours.

● solution bitube sans galerie de service mais avec gare de secours à mi-distance

Une gare de service intermédiaire, accessible aux moyens de secours et équipée pour l'évacuation des voyageurs, offre l'avantage de diviser le tunnel en deux tronçons de moins de 30 km. La plus faible longueur du parcours à effectuer entre les extrémités et la gare de secours diminue ainsi considérablement la probabilité de devoir procéder à une évacuation en tunnel. Dans cette dernière hypothèse, qui doit être considérée comme exceptionnelle, les voyageurs sont acheminés par un trottoir latéral vers des rameaux de liaison, normalement fermés, maintenus à l'abri des fumées par une suppression de l'air, et ainsi vers le deuxième tube qui sert de galerie de secours sous réserve des mesures d'exploitation utiles.

Le cas des rames de nuit et des rames à grande vitesse à 2 niveaux devra faire l'objet d'un examen ultérieur spécifique.

LA PERTINENCE DU CHOIX DE LA SOLUTION BITUBE

Le choix d'une solution bitube par rapport à une solution monotube avec galerie de service est justifié par les arguments suivants :

- Prévention et atténuation des conséquences des incidents possibles (sécurité active)
 - elle supprime les risques de collision frontale ou latérale entre deux trains circulant sur deux voies parallèles ce qui élimine la majeure partie des risques d'incidents ferroviaires, notamment collision entre un train de voyageurs et un train de marchandises ;
 - en cas d'incident, une seule voie est concernée alors que l'autre reste disponible sans risque de nouvelle collision (gabarit dégagé) ;
 - un éventuel incendie ne se propage pas à un train circulant en sens opposé ;
 - elle évite les effets aérodynamiques sur les trains Fret lors des croisements (déplacement des chargements, action sur les soupapes des citernes, etc...).

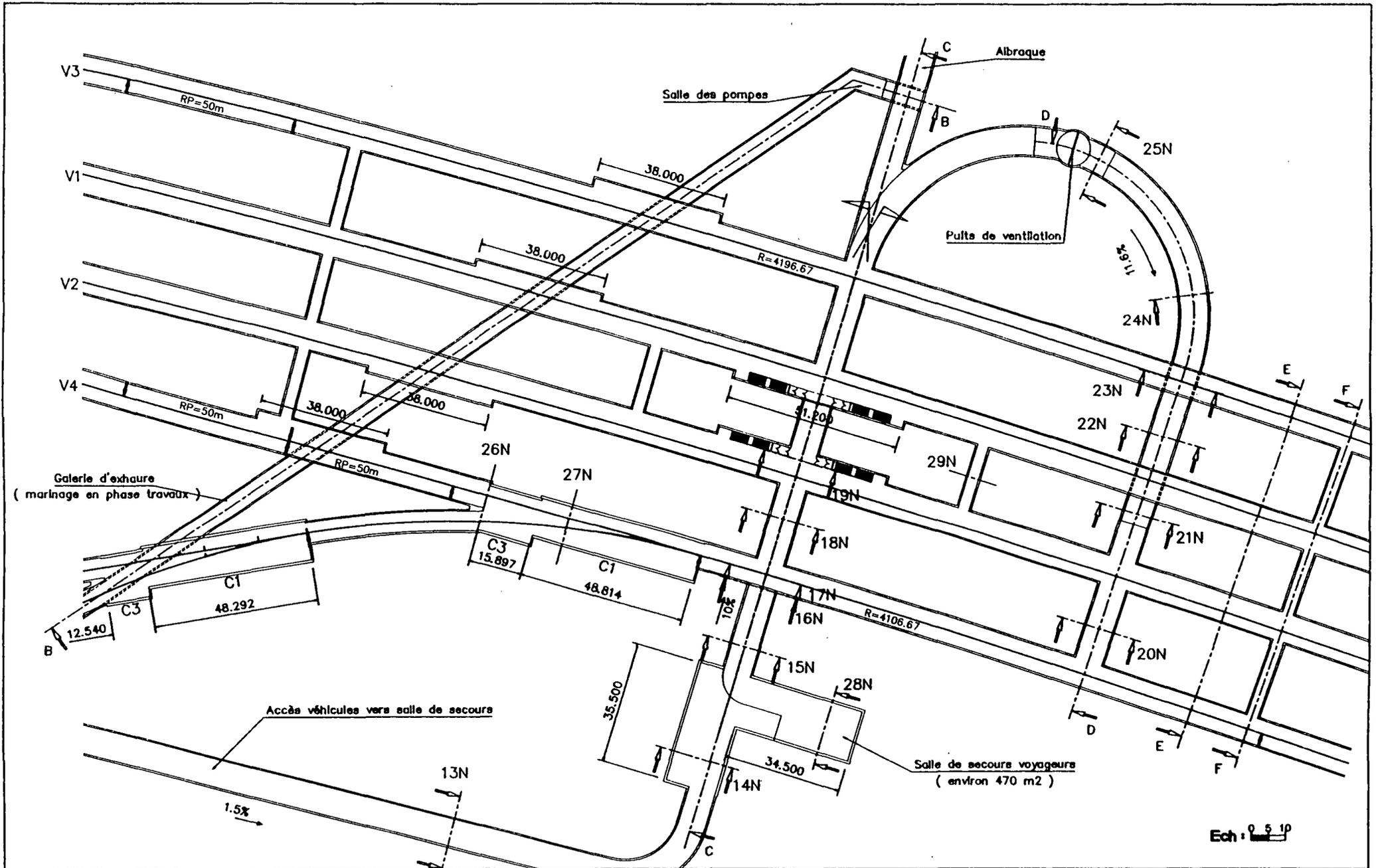
- Atténuation des conséquences d'un incident (sécurité passive)
 - le second tube peut être utilisé, étant à l'abri des fumées, pour l'évacuation et pour combattre un incendie ;
 - l'éloignement des lieux de l'incident et l'accès à des lieux sûrs se passent dans des conditions meilleures que dans le cas d'une galerie monotube avec galerie de service ;
 - il n'y a aucun risque d'accrochage pour les passagers du fait de la circulation des trains sur l'autre voie, des procédures rigoureuses étant prises en cas d'incident pour arrêter toute circulation avant pénétration dans l'autre tube ;
 - la circulation dans les deux tubes étant indépendante, il sera plus facile de prendre les mesures utiles pour des circulations particulières (transports exceptionnels...);
 - les dispositifs de ventilation et de désenfumage sont plus simples et plus efficaces : les mouvements d'air longitudinaux, provoqués naturellement par la circulation des trains dans un sens donné permettent une première élimination des fumées qu'il convient seulement d'entretenir ;
 - la solution bitube permet en outre de disposer d'un trottoir d'évacuation du côté du 2ème tube.

Ces désavantages de la solution bitube apparaissent négligeables vis-à-vis des avantages. En particulier, l'éventuelle supériorité de la solution monotube relative au gabarit plus grand pour l'intervention des secours est compensée par la présence du trottoir latéral d'au moins 1,20 mètre de largeur.

LES INSTALLATIONS FIXES

Les dispositions constructives proposées sont les suivantes :

- deux galeries séparées pour la circulation ferroviaire. En cas d'accident dans l'une, la circulation est arrêtée dans la deuxième qui sert alors de galerie de secours ;
- un quai d'évacuation et de stationnement dans chaque galerie. Sa largeur ne sera pas inférieure à 1,20 m (les bordures de quai seront assez résistantes pour assurer la fonction guidage d'un véhicule déraillé et maintenir ainsi la largeur utile du trottoir) ;
- une gare de service intermédiaire souterraine à Modane afin de diviser chaque galerie à voie unique en deux tronçons de longueur inférieure à 30 km. Cette gare disposera de deux voies de secours, une pour chaque sens de circulation, qui permettront l'évacuation des passagers et l'extinction d'un important sinistre : elle sera, en outre, le centre de départ de la première intervention et sera, en conséquence, dotée d'un ensemble de véhicules de première intervention ;
- des extrémités de tunnels aménagées (côté Susa et Saint-Jean-de-Maurienne) pour permettre l'accès des secours extérieurs et l'évacuation vers la voirie de ces centres urbains ;
- des rameaux de communication entre les deux galeries parallèles normalement obturés par des portes de manière à préserver l'indépendance des deux galeries et à bénéficier des avantages qui en découlent pour la sécurité et l'aérodynamique ;
- un système performant de désenfumage dans les galeries et dans la gare de Modane ;
- des conduites d'eau d'incendie dans les galeries ;
- des moyens d'éclairage, de repérages, de communication et d'information dans les galeries et rameaux ;
- des détecteurs de freins serrés, de boîtes chaudes et d'engagement de gabarit avant les entrées du tunnel.



GARE DE SERVICE SOUTERRAINE DE MODANE. HYPOTHESE DE TRACE NORD

**DESCRIPTION DETAILLEE DES INSTALLATIONS, DU MATERIEL
ROULANT, DES PROCEDURES D'EXPLOITATION ET D'INTER-
VENTION**

Les fiches de l'annexe 3 détaillent chacune des composantes du projet, elles devront servir de base au cahier des charges des études ultérieures.

- Fiche 1 Installations fixes
- Fiche 2 Gare de Modane et aménagements d'extrémités de tunnel
- Fiche 3 Désenfumage
- Fiche 4 Matériel roulant
- Fiche 5 Exploitation ferroviaire et centre de contrôle
- Fiche 6 Voyageurs et personnel
- Fiche 7 Autoroute Ferroviaire (voir chapitre XII)
- Fiche 8 Trains de secours et équipes d'intervention



ESSAI EN CANAL HYDRAULIQUE
TRAIN FRET AU DROIT D'UNE COMMUNICATION PAIR-IMPAIR



ESSAI EN CANAL HYDRAULIQUE
RAME A GRANDE VITESSE AU DROIT D'UN RAMEAU DE PISTONNEMENT

V - LA PRISE EN COMPTE DE L'AERODYNAMIQUE ET DE LA THERMIQUE DANS LE TUNNEL DE BASE

Les activités du sous-groupe aérodynamique et thermique font l'objet de l'annexe 4.

LA SECTION LIBRE D'AIR

A l'issue des premières études d'exploitation, il a été convenu de retenir, en première hypothèse, une vitesse de 220 km/h pour les rames voyageurs.

A cette vitesse, pour des rames 2 niveaux non étanches aux variations de pression, une section libre d'air de 40 m² pour un tube voie unique apparaît comme acceptable, mais susceptible de provoquer l'inconfort des passagers. Cette section, déduite de l'expérience des 2 réseaux, a été testée à l'aide d'un programme instationnaire.

Cette section dégage également le gabarit C pour le Fret classique.

En prévision de l'encombrement des équipements à venir (refroidissement, signalisation, réseau incendie,...), la section type envisagée dégage 41 m² de section libre d'air, une fois réalisé le quai longitudinal de sécurité.

On ne peut cependant pas considérer que le dimensionnement du tunnel doive être figé définitivement sur la base de cette première analyse car :

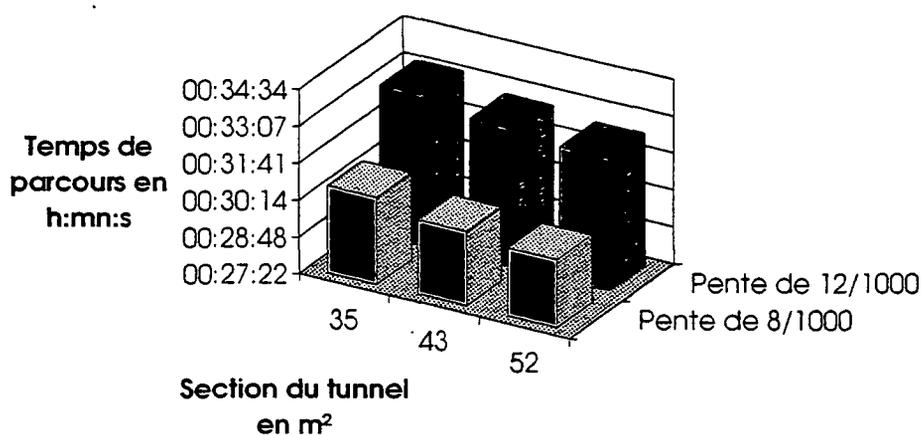
- à l'échelle de temps du projet, et compte tenu des orientations prises par les réseaux, les rames pour voyageurs appelées à circuler dans le tunnel seront très certainement étanches aux variations de pression,
- il sera possible, si nécessaire, de réduire les gradients de variation de pression par des dispositifs de décompression appropriés placés aux entrées du tunnel, et d'un coût sans commune mesure avec l'augmentation de la section de l'ensemble du tunnel.

Des sections libres inférieures à 40 m² dans l'hypothèse de rames voyageurs étanches ou pressurisées peuvent être envisagées sous réserve d'une réflexion complémentaire prenant en compte :

- les contraintes opérationnelles liées à l'exploitation de rames étanches sans renouvellement de l'air pendant la traversée du tunnel et jusqu'à équilibre des pressions intérieure et extérieure après sortie du tunnel ;

- le confort des conducteurs et agents des trains de Fret qui, même si leurs propres trains n'engendrent pas de variations de pression particulièrement gênantes, subiraient au cas où leurs véhicules ne seraient pas étanches l'effet des variations de pression provoquées par les rames à grande vitesse engagées simultanément dans le tunnel ;
- les caractéristiques mécaniques du matériel roulant de l'ensemble des réseaux appelés à emprunter l'ouvrage ;
- le comportement des marchandises ;
- la sécurité (cas d'une vitre cassée par exemple) ;
- la résistance à l'avancement, et par là, la consommation d'énergie, en particulier pour les trains hétérogènes et ceux du combiné classique. Les modélisations en cours permettront une analyse plus fine des enjeux ;
- l'allongement du temps de parcours corrélatif pour les trains Fret, et donc la diminution de capacité de la ligne.

FRET CLASSIQUE 1200 t de charge
tracté par 1 Class. 92, limité à 120 km/h



Il apparait ainsi que la réduction de la section libre d'air passera par :

- la fixation de critères de sécurité, si le confort n'est plus dimensionnant ;
- un affinement des prévisions de trafic par type de convois ;
- une meilleure connaissance des interactions train-air-tunnel tant pour la thermique que pour l'aérodynamique (essais sur maquettes et modèles mathématiques déjà engagés), ainsi qu'une meilleure connaissance de la température de la roche ;
- une réflexion approfondie sur les techniques de climatisation des rames, de pressurisation éventuelle, et plus généralement les caractéristiques du matériel roulant voyageurs et Fret.

En considérant que ces problèmes seraient résolus à l'échéance du projet, une solution de référence a été étudiée avec une section libre d'air de 35 m² dégageant le gabarit C. Cette section ménage la possibilité de confortements de voûte éventuels par cintres ou coques en béton projeté (marge de 30 cm).

DEUX TUBES SANS RAMEAUX DE PISTONNEMENT

Pour un projet de tunnel bitube, la diminution de la résistance à l'avancement peut être recherchée, en vue de l'optimisation du bilan global investissement + coûts d'exploitation, soit en augmentant la section libre du tunnel, soit en réalisant des rameaux de pistonement entre tubes.

Pour le tunnel de base, un premier bilan a été réalisé sur la base des prévisions de trafic du projet en prenant, en attendant les résultats des essais sur maquette en cours, deux hypothèses extrêmes sur les coefficients de perte de charge des rameaux.

En dépit du caractère simplifié des outils utilisés pour mener les études sur l'intérêt des rameaux de pistonement, il est possible de conclure à leur absence d'intérêt pour le projet de tunnel de base Lyon - Turin.

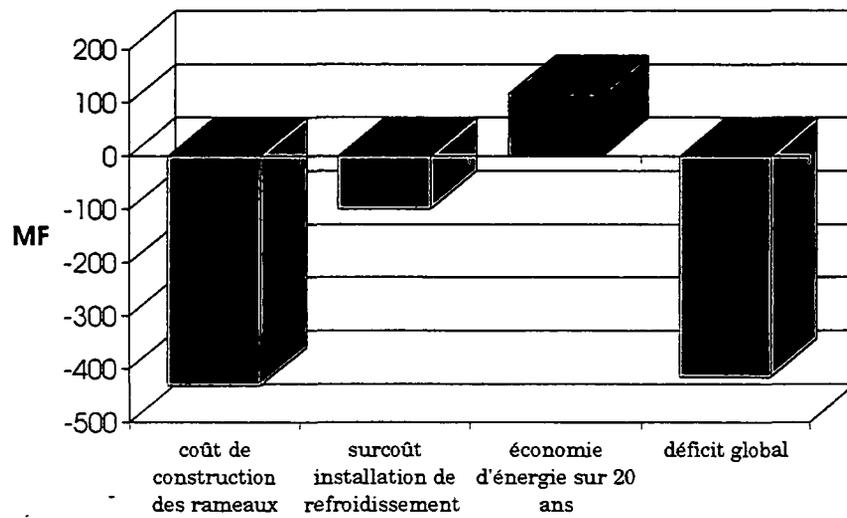
En effet, sur la base d'hypothèses de calcul a priori favorables en ce qui concerne l'efficacité des rameaux, ils ne parviennent pas à équilibrer au bout de vingt ans leurs coûts directs et indirects de réalisation (un calcul actualisé avec un prix unitaire des rameaux de 2 MF dégage un déficit de l'ordre de 265 MF dans le meilleur des cas).

L'utilisation de rameaux de pistonement serait donc financièrement négative, indépendamment de tous les inconvénients secondaires et difficilement chiffrables qu'elle entraînerait pour le renouvellement d'air (circulation de l'air en boucles fermées défavorable pour l'apport en air neuf et pour le refroidissement), le confort et la sécurité (propagation des ondes de pression).

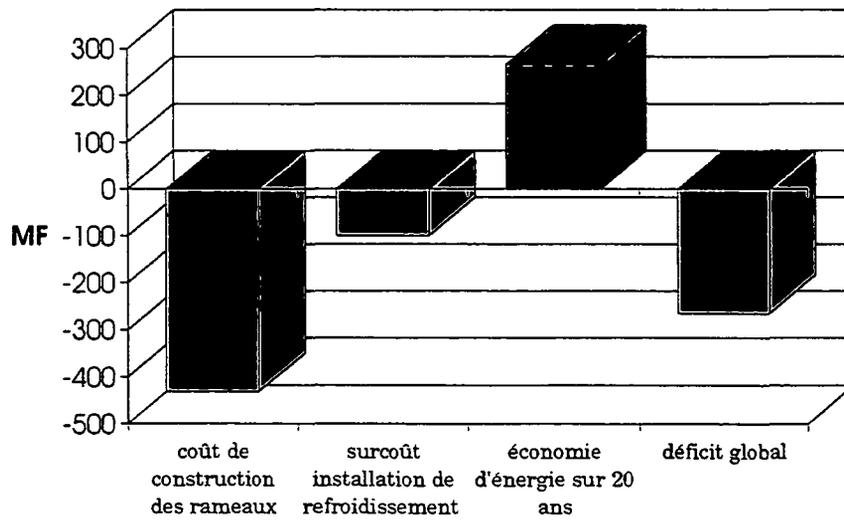
Ces réflexions ont conduit à ne pas prévoir de rameaux de pistonement.

Calcul actualisé à 8% sur 20 ans
RAMEAUX : section : $\pi \text{ m}^2$
espacement : 250 m
pertes de charge minimales

SCENARIO DE BASE
TGV + FRET CLASSIQUE (2 x 35 m²)



TGV + FRET CLASSIQUE
+ AUTOROUTE FERROVIAIRE (2 x 43 m²)



BILAN FINANCIER DES RAMEAUX DE PISTONNEMENT DANS LE TUNNEL DE BASE

LES INSTALLATIONS DE VENTILATION ET DE DESENFUMAGE

Une première étude a été confiée à l'Institut National Français de l'Environnement Industriel et des Risques (I.N.E.R.I.S.) en vue de pré-dimensionner les installations de ventilation et de désenfumage du tunnel.

La ventilation pendant la phase d'exploitation sera assurée par le pistonnement des trains qui induiront une vitesse d'air de l'ordre de 5 m/s, soit un débit de l'ordre de 200 m³/s.

La ventilation forcée ne doit donc être envisagée que pendant les tranches horaires sans circulation (blancs travaux) ; il a été retenu que cette ventilation serait réalisée au moyen des installations de désenfumage.

En ce qui concerne le désenfumage, une première approche par le calcul aboutit à une vitesse d'air nécessaire de 3 m/s correspondant à un débit de 125 m³/s.

Toutefois les premiers essais sur maquette montrent que le critère d'abaissement de la température des fumées, s'il est considéré prédominant, nécessitera une vitesse d'air de 6 m/s correspondant à un débit de 250 m³/s.

Selon le nombre de descenderies réalisées pour les attaques intermédiaires, 5 ou, à défaut, 3 usines de ventilation-désenfumage pourraient être installées, celle de la gare de Modane nécessitant a priori un puits d'extraction.

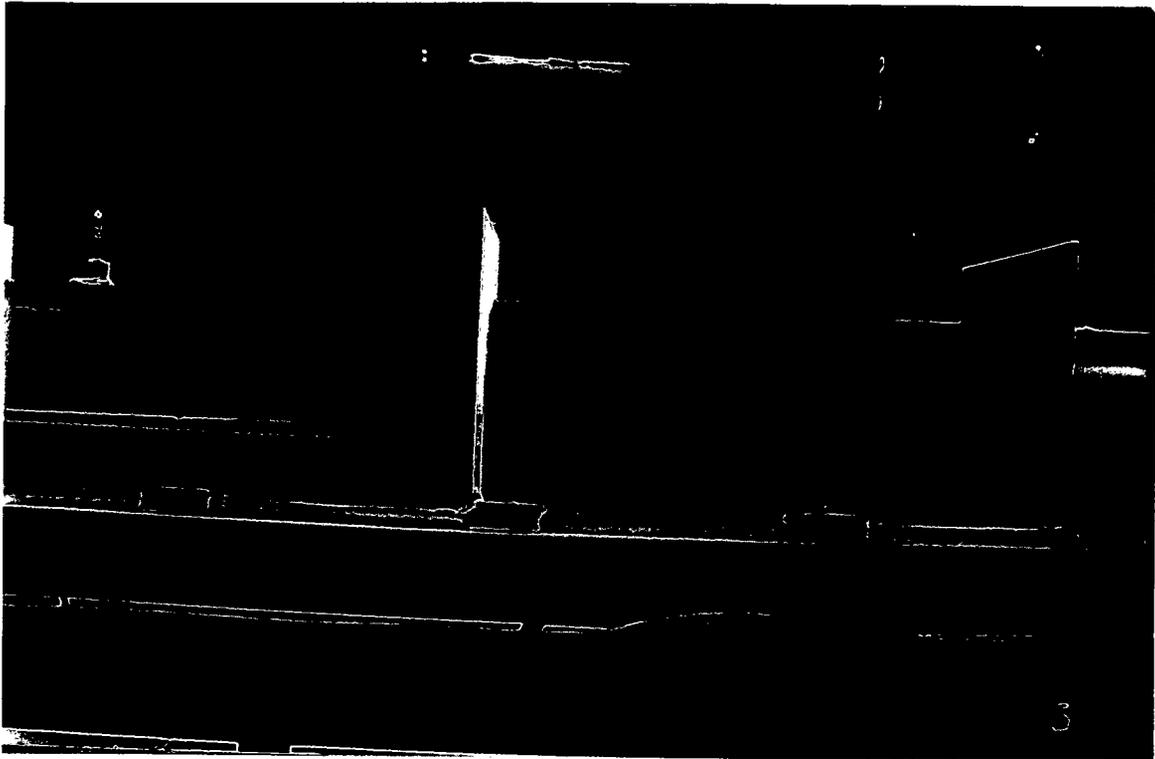
Il conviendra de les utiliser dès la phase travaux pour la ventilation de chantier.

LES INSTALLATIONS DE REFROIDISSEMENT

Une étude de pré-dimensionnement et d'estimation des coûts des installations a été confiée à la société BERTIN (TROUVIN Ingénierie sous-traitant).

L'étude a porté sur les phases d'équipement et d'exploitation.

Les températures de roches prises en compte découlent des connaissances actuelles de la géologie du site et d'une étude théorique, en particulier statistique, confiée à l'I.R.I.G.M. (Université Joseph Fourier de GRENOBLE).



ESSAI EN CANAL HYDRAULIQUE: DESENFUMAGE

Les dispositions proposées sont les suivantes :

- phase d'équipement

Si un pré-refroidissement s'avère nécessaire, plusieurs solutions sont envisagées :

- refroidissement des parois par ruissellement d'eau.
Dans l'hypothèse d'une roche initialement à 50° que l'on refroidit à 10°C, la température des parois remonte à 30°C en 2,5 mois après un ruissellement d'un an. Cette durée suffit à la mise en place du système de refroidissement pour la phase d'exploitation (bitube de conduites d'eau en épingles).
- refroidissement des parois avec le bitube de conduites d'eau en épingles ultérieurement utilisé en phase d'exploitation.
Dans l'hypothèse d'une roche initialement à 50°C, avec une température moyenne des tubes de 10°C, les parois sont refroidies, pour un diamètre des canalisations de 0,4 m, à 30° en 1 mois, en convection mixte (en utilisant la ventilation de désenfumage).

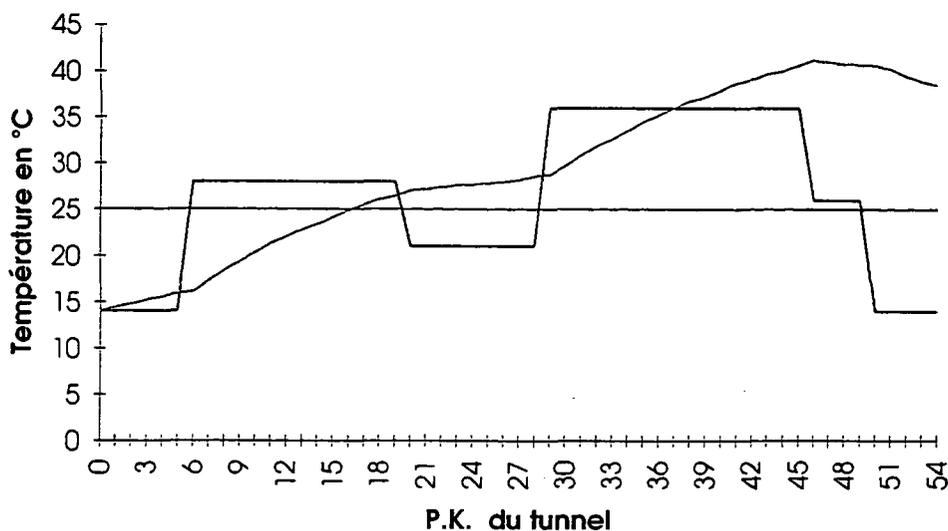
SENS FRANCE - ITALIE (le plus défavorable)

TUNNEL: section : 41 m²

rampe : 12/1000

TRAFIC : TGV + Fret classique

Profil géothermique : hypothèse basse



LEGENDE :

- température constante de roche
- température viable visée
- température stabilisée de l'air dans le tunnel

ECHAUFFEMENT A LONG TERME DU TUNNEL DE BASE

- phase d'exploitation

Refroidissement avec un bitube de conduites d'eau en épingles.

Cette solution présente les avantages suivants :

- un bitube en épingle assure :
 - . un meilleur refroidissement comparé à un seul tube de même section (développé plus grand et coefficient d'échange global plus élevé)
 - . une meilleure température moyenne de boucle
- plusieurs épingles assurent :
 - . une meilleure sécurité de fonctionnement en cas de rupture de conduite
 - . une meilleure adéquation selon les zones isothermes du terrain.

Le tunnel est supposé avoir été pré-refroidi si nécessaire au cours de la phase de mise en place des équipements.

La température moyenne des tubes est prise à 10°C et la température maximale admissible dans le tunnel est fixée à 25°C.

Le nombre de 3 usines de refroidissement est apparu comme optimum.

L'utilisation de la rivière de l'Arc comme source froide ne s'est pas avérée économiquement intéressante.

L'étude a montré, à travers le rôle joué par l'inertie thermique de l'air, le gain apporté par l'effet piston dans le tunnel bitube sans rameaux de pistonement.

On peut estimer que l'absence de ces rameaux de pistonement dans le tunnel de base permettra d'économiser, en première approche, de 75 à 100 Millions de Francs sur l'équipement de refroidissement.

De plus, on peut jouer sur cet effet de pistonement et de transport de chaleur pour réduire l'encombrement des conduites dans les zones chaudes, au cas où celui-ci poserait des problèmes, en surdimensionnant celles des régions les moins chaudes, pour un coût global inchangé.

En phase de construction, le refroidissement par ruissellement n'apparaît pas indispensable pour toute la longueur du tunnel. Il peut être envisagé dans les zones critiques, si une ventilation locale ne suffit pas, lors de l'installation du bitube de refroidissement qui précéderait l'équipement linéaire du tunnel.

VII - LE CONTEXTE GEOLOGIQUE DU TUNNEL DE BASE

GRANDS TRAITES STRUCTURAUX DES ALPES FRANCO-ITALIENNES

Domaine externe

Le domaine externe représente un ensemble dont la partie axiale correspond au soulèvement de la vieille plate-forme hercynienne revêtue de sa couverture secondaire.

Domaine interne

Le domaine interne s'oppose au précédent par sa structure plus complexe résultant d'un état initial déjà très fracturé qui a subi en fin d'évolution une tectonique intense et un métamorphisme élevé.

Cette structure très complexe est marquée par de très nombreuses superpositions et imbrications de nappes et par des surfaces de chevauchements importantes.

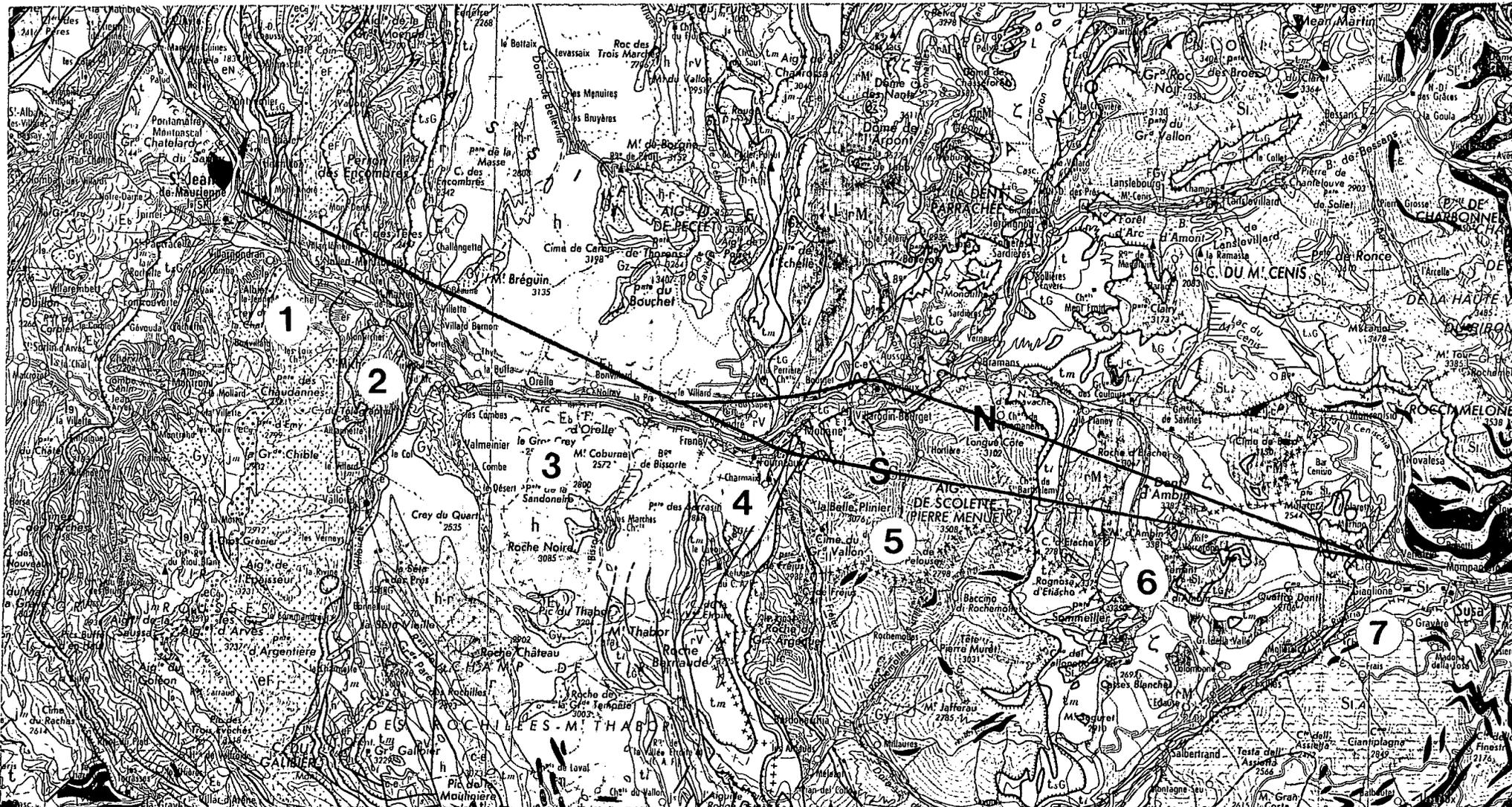
Les grandes unités ainsi concernées sont appelées respectivement, d'Ouest en Est :

- zone ultradauphinoise
- zone subbriançonnaise
- zone briançonnaise
- zone piémontaise

DESCRIPTION SOMMAIRE DES GRANDES UNITES STRUCTURALES TRAVERSEES PAR LE PROJET

Une carte et une coupe géologiques sont présentées en annexe 8.

Compte tenu de la longueur de l'ouvrage envisagé (environ 54 km) et de son orientation globalement perpendiculaire aux grandes unités alpines, le projet franchira la chaîne alpine, d'Ouest en Est, de la zone ultradauphinoise à la zone piémontaise, laquelle a été subdivisée en trois ensembles. Ceci conduit à distinguer sept grandes zones géologiques.



0 km 10 km

ECHELLE

TRACE NORD TRACE SUD

CARTE GEOLOGIQUE GENERALE DU SECTEUR DE ST JEAN-DE-MAURIENNE A SUSAL

(extrait de la carte géologique d'Annecy au 1/250000 - édition B.R.G.M.)

- 1 - Zone ultra-dauphinoise
- 2 - Zone subbriançonnaise
- 3 - Zone houillère briançonnaise
- 4 - Zone briançonnaise
- 5 - Zone piémontaise (schistes lustrés)
- 6 - Zone briançonnaise (Ambin)
- 7 - Zone piémontaise (calcschistes à roches vertes)

La zone ultradauphinoise : cette unité est constituée d'une série de schistes siliceux, de grès, de calcschistes et de flyschs d'âge crétacé et tertiaire. Ces terrains sont de qualité excellente à bonne.

Dans le secteur de la tête du tunnel (côté Saint-Jean-de-Maurienne), cette formation est surmontée par un cône d'éboulis constitué de terrains de qualité médiocre à mauvaise, avec présence d'eau, que le projet traversera sur environ 1000 m.

La zone subbriançonnaise : cette unité, tectoniquement complexe peut se décomposer en deux sous-ensembles :

- la digitation du perron des Encombres : la partie Ouest est constituée d'une série homogène de marnes, de calcschistes et de calcaires, d'âge jurassique, terrains de qualité bonne à moyenne. La partie Est, en revanche, est caractérisée par l'extrême variabilité des faciès (flyschs, schistes, cargneules, gypses,...) d'âge triasique.
- La zone des gypses : il s'agit d'une masse importante de gypse (anhydrite) emballant des écaillés et lambeaux de terrains. Ces terrains sont de mauvaise qualité, en particulier en cas de présence d'eau.

La zone houillère briançonnaise (Ouest de Modane)

Fortement plissée lors du raccourcissement imposé par la tectonique alpine, cette zone est décomposée en trois ensembles distincts, de l'ouest vers l'est :

- le houiller productif constitué majoritairement de niveaux gréseux intercalés de niveaux de schistes noirs relativement tendres, avec présence éventuelle de niveaux de charbon et de grisou. Les terrains, de faciès hétérogène, sont globalement de qualité moyenne à médiocre ;
- le houiller stérile composé essentiellement de grès (grès de la Praz) qui constitue un ensemble de terrains de bonne qualité ;
- Les gneiss du Sapey, ensemble hétérogène composé de gneiss oillé et de granitoïde reposant sur le Stéphano-Permien "gneissique". L'ensemble constitue un massif de très bonne qualité.

La zone briançonnaise (Est de Modane, Vanoise)

Cette zone est représentée par une épaisse série stéphano-permo-triasique tectoniquement très complexe et dont la structure interne est très difficilement interprétable. Cet ensemble repose sur un socle cristallin.

Les faciès rencontrés sont des gypses (anhydrites), des conglomérats, des micaschistes, des dolomies, des cargneules et des quartzites plus ou moins broyées, avec risque de venues d'eau importantes.

La zone piémontaise du côté français (Schistes Lustrés)

Elle est constituée d'une épaisse série monotone de calcschistes, reposant sur une "semelle de glissement" (anhydrites) triasique. Ces Schistes Lustrés constituent des terrains de bonne qualité.

La zone d'Ambin (massif d'Ambin)

Ce massif appartient géologiquement à la zone briançonnaise et est constitué d'un vaste dôme à coeur de roche gneissique surmonté d'une série de micaschistes (stéphano-Permien et Permo-Trias) très comparable à celle de la Vanoise. Cet ensemble constitue des terrains de très bonne qualité.

La zone Piémontaise du côté italien (calcschistes à roches vertes)

Les terrains rencontrés dans cette zone, constituée de calcschistes et de roches vertes, sont de bonne qualité, sauf éventuellement les zones broyées et les cavités que l'on peut rencontrer à proximité de la base de la formation, le long du contact avec le socle. La tête du tunnel côté Susa est située dans cette formation.

Nota

La classification des terrains brièvement exposée reste très générale vis-à-vis des travaux en souterrain et peut être entendue de la manière suivante :

- terrain de qualité excellente : pas de difficulté d'excavation, pas de problème de soutènement ;
- terrain de bonne qualité : nécessité de soutènement léger ;
- terrain de qualité moyenne : terrain hétérogène pouvant présenter des difficultés au cours de l'excavation, nécessité d'un soutènement léger ;
- terrain de mauvaise qualité : terrain de faible résistance mécanique, de mauvaise tenue, pouvant conduire à de graves difficultés d'excavation, nécessité d'un soutènement lourd à très lourd.

Cette classification sera approfondie par la suite.

PRINCIPAUX FACIES DE ROCHES RENCONTRES PAR LE PROJET

Au cours des années 1991 et 1992, les campagnes de sondages ont comporté essentiellement :

- côté français :

- . 10 sondages dont 2 à 1200 mètres dans les secteurs de Saint-Jean-de-Maurienne (tête du tunnel), Fourneaux (passage sous les alluvions de l'Arc), Avrieux, Longe Côte, la Norma (partie centrale du tracé, zone de la gare de service)
- . des investigations sismiques réflexions haute résolution, grand angle et verticales, associées aux sondages.

- côté italien :

- . 3 sondages jusqu'à 210 mètres entre Susa et S.Andrea (4 premiers kilomètres depuis la tête du tunnel),
- . des investigations sismiques réflexion, réfraction et verticales associées aux sondages.

Le bilan de ces campagnes de sondage est présenté en annexe 5.

Sur l'ensemble des terrains traversés par le projet et en fonction des critères de résistance mécanique et d'abrasivité, quatorze faciès principaux ont pu être différenciés.

Le classement est établi à partir d'essais réalisés sur des échantillons prélevés au cours des différentes campagnes de reconnaissances et à partir de données recensées dans la bibliographie (étude I.R.I.G.M., Université J. FOURIER de Grenoble).



HELIPORTAGE DU MATERIEL DE SONDAGE

AQUIFERES SUSCEPTIBLES D'ETRE RECOUPES PAR LE TRACE

Plus de la moitié du tunnel est situé sous le niveau de la vallée de l'Arc, ce qui pourrait être la cause de venues d'eau dans certains secteurs (fractures, zones de roches broyées) au cours des travaux.

Pour le tunnel étudié, le seul matériau poreux aquifère traversé est celui du cône de déjection rencontré à la tête côté Saint-Jean-de-Maurienne. Des circulations de type chenaux sont susceptibles d'être rencontrées.

Sur le restant du tracé, ce sont les grands accidents géologiques qui poseront le plus de problèmes car ils constituent des aquifères présentant un important développement vertical. Les fortes pressions hydrauliques correspondantes peuvent induire des phénomènes de débouillage. Le tracé recoupera plusieurs de ces accidents géologiques.

Localisation des différents risques, d'Ouest en Est

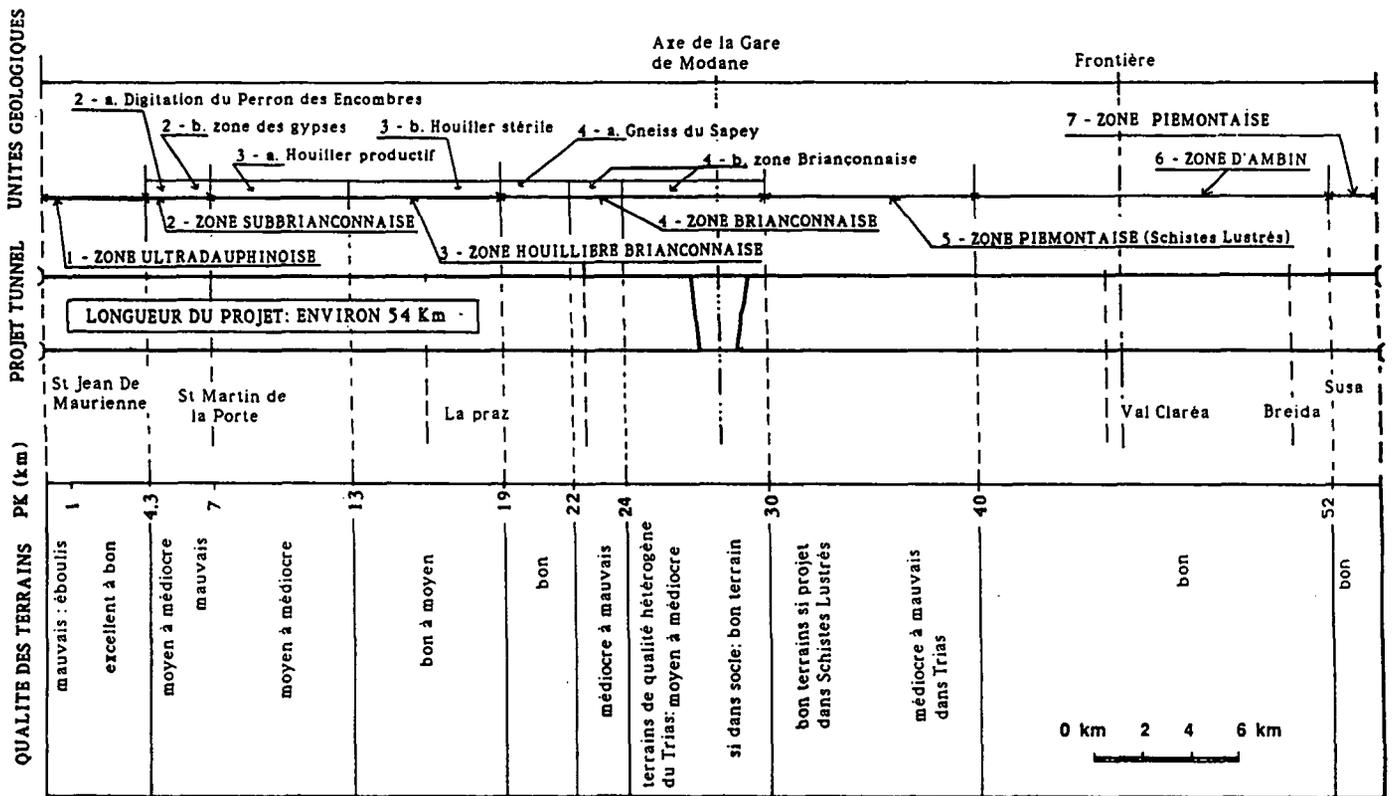
Dans les zones ultradauphinoise et subbriançonnaise, l'accident géologique le plus notable est celui de la zone des gypses qui marque le contact de base du subbriançonnais avec le houiller briançonnais où d'importantes circulations profondes d'eaux sulfatées sont à craindre.

Dans le houiller proprement dit, les risques de venues d'eau significatives paraissent peu nombreux à cause d'une forte couverture. Cependant, ce massif est aquifère et il est difficile de prévoir les zones préférentielles de circulation.

Le passage du tunnel sous l'Arc est un point hydrogéologique important pour le tracé. La variante Sud du tracé passe sous les alluvions de l'Arc, dans la cuvette de Modane. Celles-ci globalement perméables sur une grande épaisseur, contiennent une nappe phréatique de grandes dimensions laquelle pourrait communiquer, par la présence de fractures, avec des circulations de fractures dans le gneiss du Sapey.

La variante Nord paraît plus favorable au niveau du passage sous l'Arc, car il n'y a pas d'alluvions mais des circulations de fractures sont à prévoir.

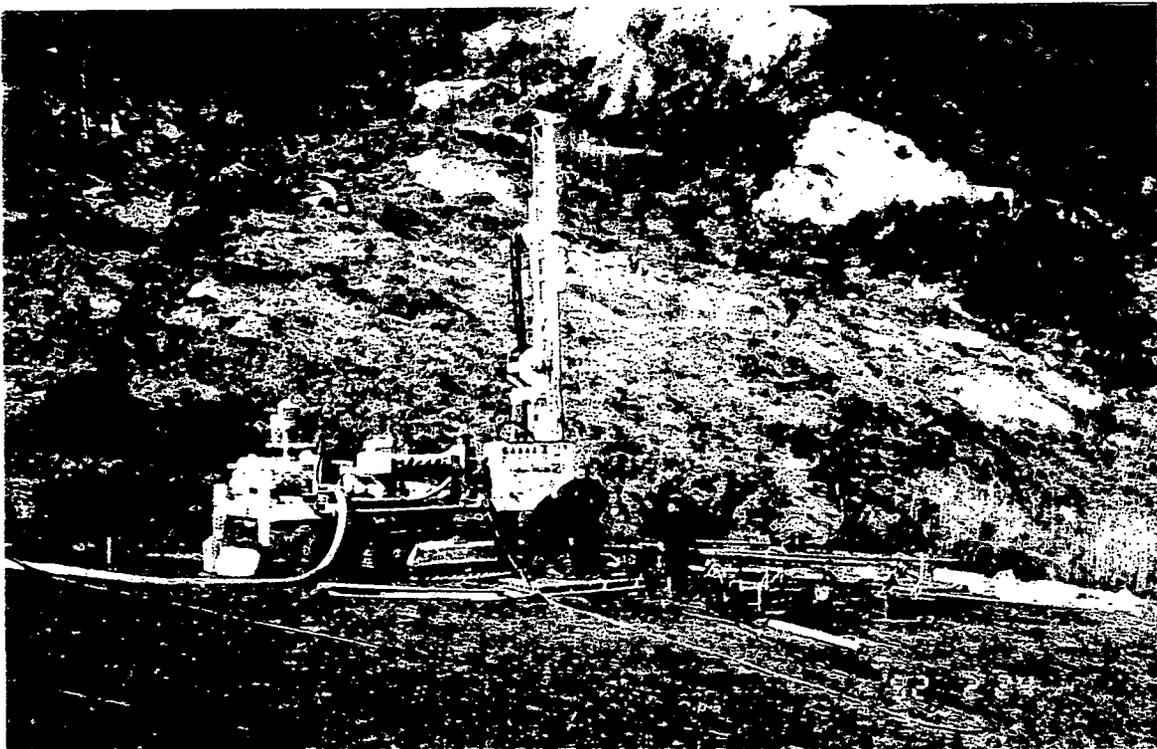
Au-delà de l'Arc, dans les zones piémontaise et d'Ambin (où la bibliographie ne nous renseigne que jusqu'à 1000 mètres de profondeur environ), la géologie devient imprécise sur une longueur de plusieurs kilomètres, ce qui rend délicat tout commentaire hydrogéologique. Le recouvrement est fort à très fort ce qui rend moins probable la liaison avec des venues d'eau de la surface qui restent cependant possibles au passage des accidents géologiques. Au-delà du massif d'Ambin, le niveau de risque est comparable à celui rencontré dans le houiller.



REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES GRANDES UNITES GEOLOGIQUES ALPINES RENCONTREES PAR LE TUNNEL DE BASE



MATERIEL DE RECONNAISSANCES SISMIQUES



MATERIEL DE FORAGE

VIII - L'INCIDENCE DE LA GEOLOGIE SUR LE CONCEPTION ET LA REALISATION DU TUNNEL DE BASE

LE TRACE

L'orientation générale Ouest-Est du projet est favorable car normale aux principaux accidents de terrain liés à la tectonique générale elle aussi d'orientation Ouest-Est. Cependant un tracé optimum doit être recherché pour bénéficier au maximum des meilleures conditions possibles. Ce tracé optimum résultera de plusieurs facteurs :

- la recherche des meilleurs terrains ;
- la recherche des zones de moindre contraintes naturelles (a priori les zones de moindre couverture) ;
- la possibilité d'accès intermédiaires ;
- une bonne réponse aux données de programme (a priori le tracé le plus court).

Pour cela un fuseau a été défini, délimité par deux tracés (Nord et Sud) présentés en annexe 9. En fait, le tracé est pratiquement figé entre Saint-Jean-de-Maurienne et la Praz, et c'est seulement entre La Praz et Susa que le fuseau s'élargit, principalement dans le secteur de Modane.

Initialement, l'analyse des données géologiques de surface avait conduit à juger préférable de passer au Sud de Modane pour bénéficier au maximum de la bonne configuration que représentent les gneiss du Sapey et franchir dans sa moindre largeur la zone triasique médiane, de configuration générale plutôt défavorable.

Mais il restait cependant une grande interrogation sur le niveau de la semelle triasique séparant la base des schistes lustrés du socle cristallin, que le projet pourrait chevaucher sur une longueur plus ou moins importante selon justement l'implantation de ce niveau triasique. Après la campagne de reconnaissances de l'été 1991, une réflexion a été menée sur l'intérêt d'un tracé implanté au Nord de l'Arc au niveau de Modane.

L'interrogation qui se pose sur le tracé Sud n'est cependant pas supprimée au Nord mais la longueur où elle existe est moindre. Cela est un premier avantage qui s'ajoute à d'autres :

- le franchissement de l'Arc dans la zone d'Avrieux se fait dans de meilleures conditions (contrairement à la zone de Fourneaux, absence d'alluvions épaisses, présentant le risque d'un immense réservoir d'eau "suspendu" au-dessus du projet),
- franchissement sur plusieurs kilomètres du socle Vanoise en rive Nord de l'Arc de configuration favorable (les sondages de la campagne 1992 semblent indiquer un socle plus profond ; cependant les terrains de type micaschistes rencontrés sont favorables aux travaux),
- moindre hauteur de couverture, et sur une plus faible longueur, dans la traversée du massif d'Ambin.

Il y a cependant sur le tracé Nord une incertitude sur les conditions de traversée de la zone triasique médiane plus étendue que sur le tracé sud. La levée de ces incertitudes qui sont liées aux risques d'existence de zones broyées aquifères est un des objectifs de la campagne de sondage 1992, dont l'exploitation des résultats s'achèvera dans les premiers mois de 1993.

Par ailleurs l'implantation de la gare de service souterraine de Modane, ouvrage complexe de réalisation délicate, est commandée par la qualité des terrains qui doit être la meilleure possible, la hauteur de couverture qui doit être la plus petite possible (300 à 400 m pour le tracé Nord, 500 à 600 m pour le tracé sud). Ces conditions optimum sont nécessaires compte tenu de l'importance des ouvrages constituant la gare et de leur juxtaposition entre eux qui généreront de fortes contraintes dans les terrains environnants. Enfin, la possibilité de faire aboutir une descenderie au centre du dispositif est pratiquement indispensable.

Les résultats des campagnes de reconnaissance 1992 permettront sans doute de fournir des informations supplémentaires sur les risques de zones difficiles au Nord.

Parallèlement une étude théorique de la répartition des contraintes naturelles devrait apporter d'autres éléments nécessaires au calage définitif du tracé qui sera retenu pour réaliser les premières galeries de reconnaissance.

Seules ces dernières permettront de lever clairement les incertitudes.

LE PROFIL EN LONG

Saint-Jean-de-Maurienne est située à 540 mètres d'altitude, et Susa à 500 mètres d'altitude.

Depuis les deux têtes du tunnel, le profil en long présenté en annexe 9 est montant jusqu'à un point haut médian à proximité de la gare de service de Modane.

Ceci permettra :

- l'évacuation de l'eau sans dispositif de relevage, et donc dans les meilleures conditions de sécurité,
- la limitation de la couverture de terrain dans le secteur de la gare de Modane, ce qui est plus favorable pour réaliser cet ouvrage complexe,
- la limitation de la longueur des descenderies d'attaques intermédiaires, tant pour faciliter la réalisation du génie civil que les équipements techniques (certaines descenderies permettront d'acheminer l'air de la ventilation-désenfumage, les canalisations de refroidissement, l'énergie...) et l'exploitation (certaines descenderies serviront d'accès de sécurité ou de maintenance).

La valeur maximale des pentes longitudinales en tunnel est de $12^{\circ}/\text{‰}$ pour permettre la traction des trains de Fret par une seule locomotive.

Une telle rampe en tunnel est en première approche homogène avec les rampes de $15^{\circ}/\text{‰}$ des tronçons d'accès pour le Fret, mais une optimisation (dans le sens de la diminution) devra être faite ultérieurement, selon les types de trafic définitivement retenus, en prenant en compte notamment :

- le surcoût investissement lié à une rampe plus faible,
- les économies d'exploitation correspondantes (énergie traction, refroidissement...)
- l'augmentation potentielle de capacité du tunnel du fait de durées de traversée plus faibles et d'une meilleure homogénéité des vitesses effectives des trains.

La position du point haut du profil en long devra également être optimisée pour obtenir un maximum d'attaques montantes à partir des accès intermédiaires.

LE PROFIL EN TRAVERS : SECTION BITUBE

Sans compter l'aspect financement, intérêts intercalaires..., le coût d'un monotube avec galerie de service est, en première approche, équivalent à celui d'un bitube sans galerie de service ; cependant, du fait des fronts de taille plus petits (favorables en particulier à l'utilisation de tunneliers), la solution bitube doit permettre d'envisager la réduction des délais, et par là-même la réduction du coût, financement compris.

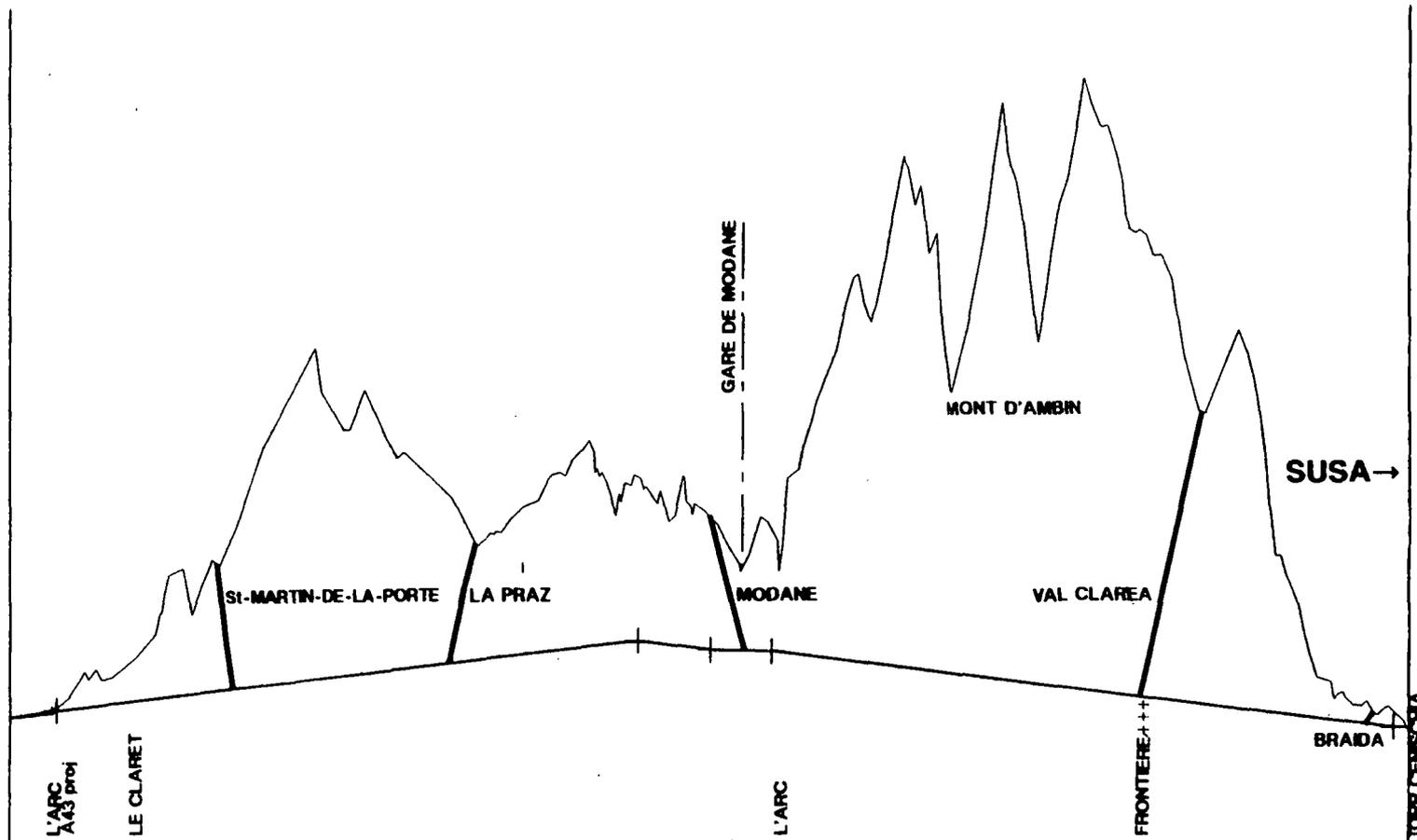
La solution bitube limite les effets de convergence des terrains sous forte couverture et minimise les difficultés de réalisation (en particulier un des tubes sert de galerie de reconnaissance à l'autre).

En revanche la réalisation de communications pair-impair s'avère coûteuse en solution bitube. Les études d'exploitation ayant montré que deux communications à proximité de la gare de service de Modane suffisent à garantir une bonne capacité de l'ouvrage, il apparaît que la solution bitube est géotechniquement souhaitable.

**PROFIL EN LONG INDICATIF
DU TUNNEL DE BASE**

← St-JEAN

SUSA →



PLAN DE COMPARAISON 0

ZP DES SOMMETS DE TANGENTES	569.61		854.61	819.36	814.43		513.40					
KM DES SOMMETS DE TANGENTES	1+882.68		25+632.60	28+569.60	31+037.22		56+376.56					
KM DANS LA PLANCHE		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
DECLIVITES GEO.PROJET	15.00 1822.70		12.00 23389.97	12.00 2512.05	2.00 2243.84		11.88 25104.57					
TRACE EN PLAN	730.65	AL	R=6250	AL	2603.12	AL	AL	AL	AL	AL	R=5500 1456.07	AL
		14593.33	3527.72	5210.06	2603.12	9612.33	8952.49					
TUNNEL		55KM										

IMPLANTATION DES TETES DE L'OUVRAGE

Côté français, la tête du tunnel de base est prévue à l'est de Saint-Jean-de-Maurienne, afin de bénéficier des espaces disponibles dans cette gare pour assurer la fusion des trafics voyageurs T.G.V. depuis la ligne nouvelle et des trafics Fret et voyageurs classiques depuis la ligne existante. Venant de Saint-Jean-de-Maurienne, la ligne, devenue mixte, franchit l'Arc, passe sous la future autoroute A43 avant d'atteindre la tête du tunnel de base située dans le cône d'éboulis de Saint-Julien-Mont-Denis. Un contournement en tunnel par le Nord de Saint-Jean-de-Maurienne permettrait de s'affranchir de la traversée de ce cône, peu favorable au creusement d'une galerie. Un tel tracé, rallongeant l'ouvrage de 3,5 km environ, aurait des répercussions telles sur le coût et sur la fonctionnalité du projet (fusion des trafic T.G.V. et Fret, possibilité d'aménager un faisceau de rétention des trains lents...) que cette variante n'est actuellement pas retenue.

Côté italien, la tête du tunnel est prévue près du secteur habité de Susa, à environ 500 mètres du bâtiment voyageurs de la gare actuelle, au droit d'un éperon rocheux (calcschistes) qui présente de bonnes conditions de stabilité.

La zone de tête considérée intéresse 700 mètres de tunnel pour lesquels la couverture des terrains est de l'ordre de 20-30 mètres. Sur ce tronçon, les terrains au niveau du tunnel seraient constitués essentiellement de calcschistes, plus ou moins altérés, et de matériaux sans cohésion ou partiellement cimentés, d'origine morainique ou détritique, de dimensions très hétérogènes. Il appartiendra aux reconnaissances de vérifier si ces terrains identifiés en surface intéressent vraiment le projet et justifient des conditions d'exécution particulières.

Le site restreint de la vallée, conjointement aux exigences géométriques de tracé pour le raccordement du tunnel à la nouvelle ligne Susa-Torino, ne permettra pas de déplacement substantiel de la tête de l'ouvrage. Cependant il reste possible qu'une optimisation du profil en long justifie un déplacement des têtes.

LE TYPE DE POSE DE LA VOIE

Si l'intérêt d'une pose sur dalle est généralement admis en ce qui concerne la maintenance ultérieure, trois axes de recherches devront être poursuivis avant de pouvoir conclure :

- la capacité d'une pose sur dalle à admettre des mouvements relatifs de plusieurs centimètres dans les terrains encaissants ;
- le niveau de bruit à l'intérieur des rames et la capacité de la voie sur dalle à atténuer les gradients de pression de manière similaire à une voie ballastée ;
- la possibilité de maintenir les caractéristiques rigoureuses de la voie pour les trains rapides voyageurs malgré des circulations Fret lourdes.



IMPLANTATION PREVUE POUR LA TETE DU TUNNEL COTE St-JEAN-DE-MAURIENNE



IMPLANTATION PREVUE POUR LA TETE DU TUNNEL COTE SUSA

LES DESCENDERIES INTERMEDIAIRES

Outre la descenderie de Modane desservant la gare de service, il est prévu quatre autres descenderies.

La première côté français se situe au Km 7,000 depuis la tête du tunnel, au droit de Saint-Martin-de-la-Porte. Sa longueur est de 1900 m.

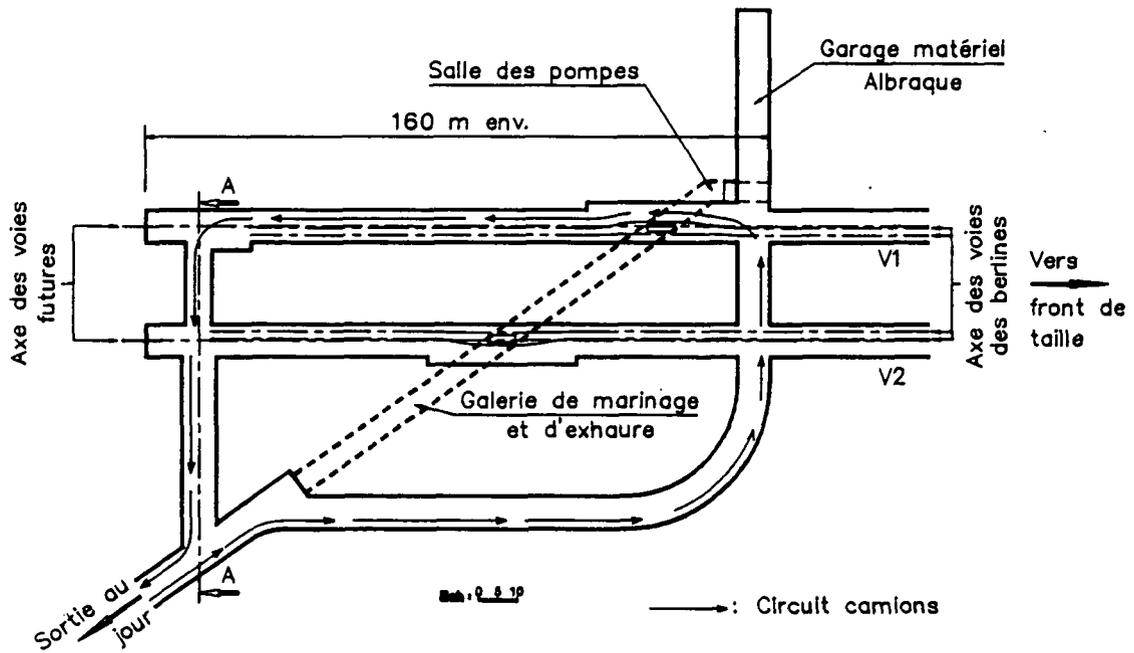
Au PK 15,700 est envisagée la deuxième descenderie d'une longueur de 2000 m (secteur de La Praz).

Au PK 43,700 est prévue la descenderie de Val Clarea en territoire italien qui avec ses 4900 m serait la plus longue. Elle serait vraisemblablement aussi la plus difficile à implanter, ses accès ne se présentant pas a priori dans de bonnes conditions. Mais son intérêt est très important pour la diminution des délais de creusement du tunnel.

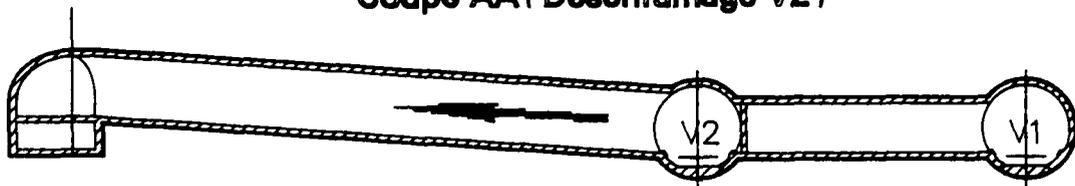
A 3,5 km de la tête côté Susa est prévue, sur la localité de Braida une descenderie d'attaque longue seulement de 300 m. C'est cette faible longueur qui en justifie l'existence, celle-ci pouvant permettre notamment de dégager rapidement 3,5 km de tunnel, de diminuer l'impact du chantier dans le secteur de Susa et de commencer peut-être avec un peu d'avance certains travaux d'équipement.

En phase travaux, ces descenderies auront un grand rôle puisqu'elles permettront la desserte des chantiers (amenée des matériels, matériaux, personnels, fluides, énergie, ventilation, exhaure) en de multiples points et concourront ainsi à la diminution des délais de construction. Leur desserte devra être particulièrement bien assurée (routes, voies ferrées si possible) et de leur conception dépendra la bonne marche des chantiers, en particulier leur point de jonction avec le tunnel au droit duquel s'organisera toute la desserte et la sécurité du chantier.

Mais durant l'exploitation leur rôle sera tout aussi important puisque toutes pourront assurer le désenfumage ou la ventilation en cas de sinistre (leur tête sera à cet effet aménagée en usine de ventilation) et que trois d'entre elles assureront l'amenée du fluide de refroidissement.



Coupe AA (Désenfumage V2)



PLAN ET COUPE SCHEMATIQUES D'UNE DESCENDERIE

LES MODALITES D'EXECUTION

En matière de travaux souterrains, les réflexions préalables à l'établissement d'un projet s'articulent autour de différents thèmes : le creusement, les soutènements primaires, les revêtements définitifs, mais aussi tout ce qui leur est associé, à savoir l'évacuation et la mise en dépôt des déblais, l'exhaure (c'est-à-dire l'évacuation des eaux en cours de chantier), la ventilation, l'acheminement des personnels et des matériaux,... Tous ces thèmes ne peuvent être abordés sans avoir constamment à l'esprit les principaux facteurs influant sur les conditions de travail.

En particulier, la longueur de l'ouvrage et sa profondeur, qui ici sont exceptionnelles, seront déterminantes sur le choix du mode de creusement et l'organisation de l'ensemble des tâches qui s'enchaînent derrière le front de taille, c'est-à-dire, sur toute l'organisation de la logistique du chantier.

Les hypothèses qui ont été retenues dans le cadre de ce rapport afin de fournir un coût et un délai d'exécution n'ont qu'un caractère provisoire et pourront éventuellement être remises en cause à l'issue de la réflexion évoquée dans le présent rapport.

On se limitera ici à résumer les réflexions qui sont développées en annexe 6.

Le creusement

Le creusement à l'explosif

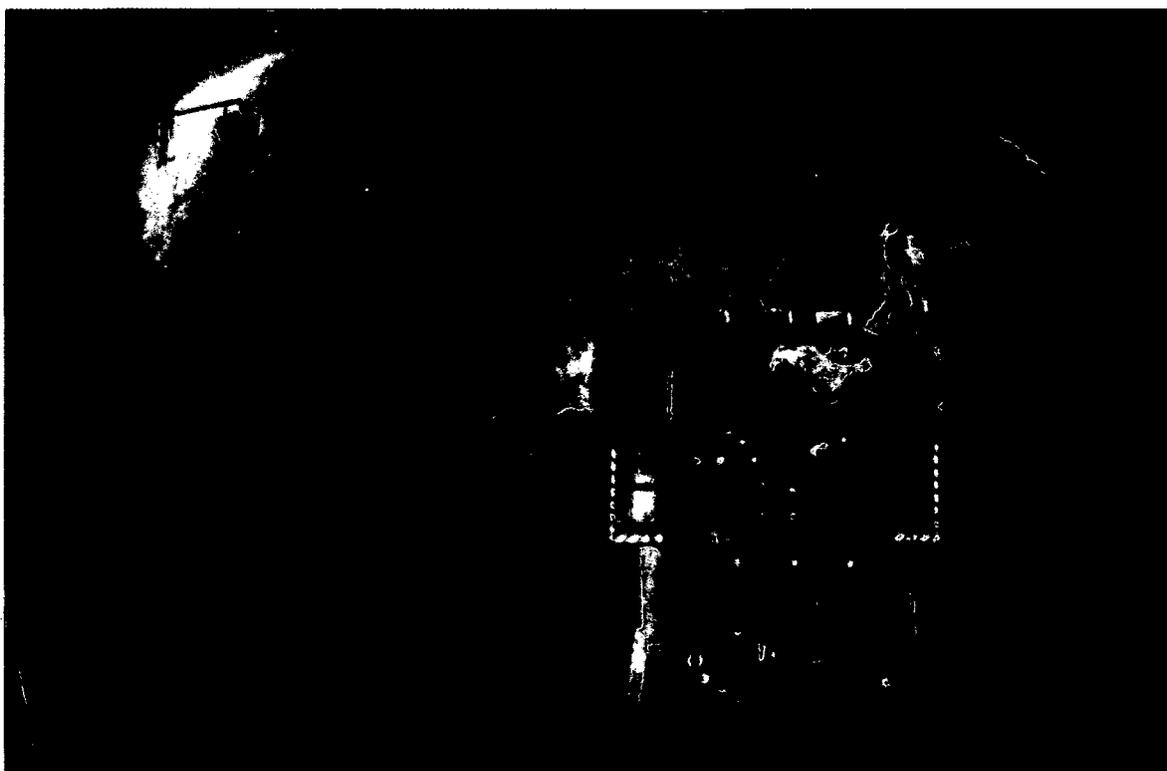
De nombreuses raisons nous incitent à penser que la réalisation de ce chantier fera appel à des méthodes industrielles et en particulier à l'utilisation de tunneliers, si ce n'est en totalité, du moins sur de grandes longueurs.

Toutefois, compte tenu des inconnues qui existent encore sur leur emploi dans les conditions exceptionnelles de profondeur qu'ils rencontreront, la solution creusement à l'explosif a servi de base à l'étude de faisabilité pour établir les coûts et les délais de construction puisque l'expérience actuelle des grands tunnels sous forte couverture démontre que le creusement peut être réalisé de cette manière.

Cette méthode est bien adaptée au creusement dans le rocher, tant du point de vue technique que du point de vue économique, et permet d'obtenir de bonnes cadences d'avancement. Par exemple, le tunnel routier du Fréjus situé à proximité de notre projet, mais avec une moindre couverture, a été réalisé de cette manière : pour une section utile de 70 m², les avancements ont été par attaque de 200 m/mois à 16 postes de travail par semaine.

Cette méthode présente cependant l'inconvénient de ne pas toujours permettre une maîtrise correcte de la géométrie de l'excavation, ce qui conduit à d'importants hors profils et donc à des consommations de béton supérieures aux quantités nécessaires sur le strict plan mécanique. Sous très forte couverture, cet inconvénient peut conduire à cause des irrégularités de parement qui en résultent, à des concentrations de contraintes provoquant des phénomènes d'éclatement de la roche amplifiant encore l'extension des hors profils. Pour s'y opposer, le boutonnage du terrain doit être densifié, ce qui conduit à de nouveaux surcoûts. Un inconvénient de l'emploi de l'explosif est l'obligation de doubler la ligne de ventilation soufflante amenant l'air frais par une ligne de ventilation aspirante à front de taille pour évacuer les fumées résultant du tir, d'où des encombrements de ventubes exigeant des ouvrages provisoires plus importants.

Mais à l'heure où les effectifs spécialisés en travaux de type minier tendent à se réduire, le principal désavantage tient sans doute aux énormes moyens en personnel que nécessite une méthode peu industrialisée et peu industrialisable, d'autant qu'une multiplication des attaques sera nécessaire à la tenue des délais.



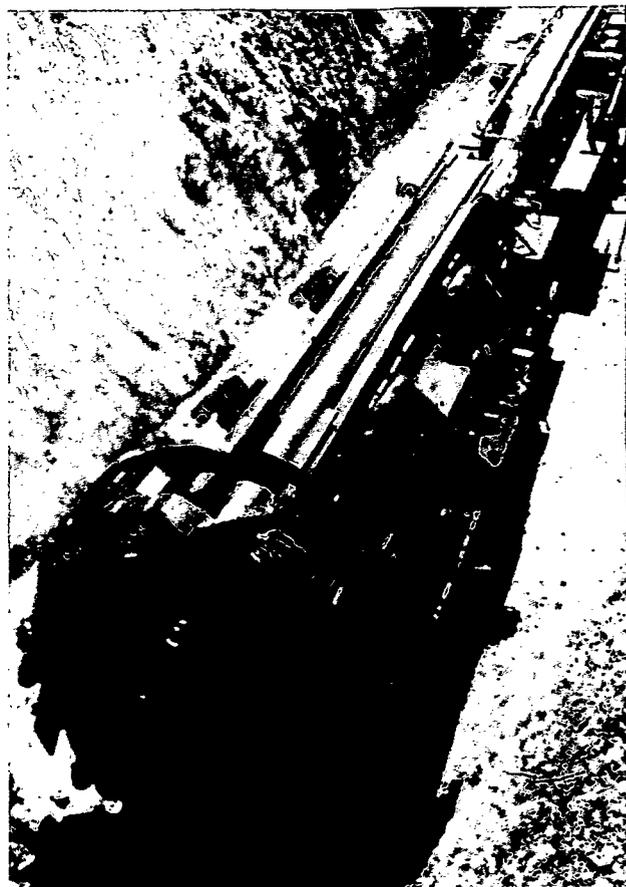
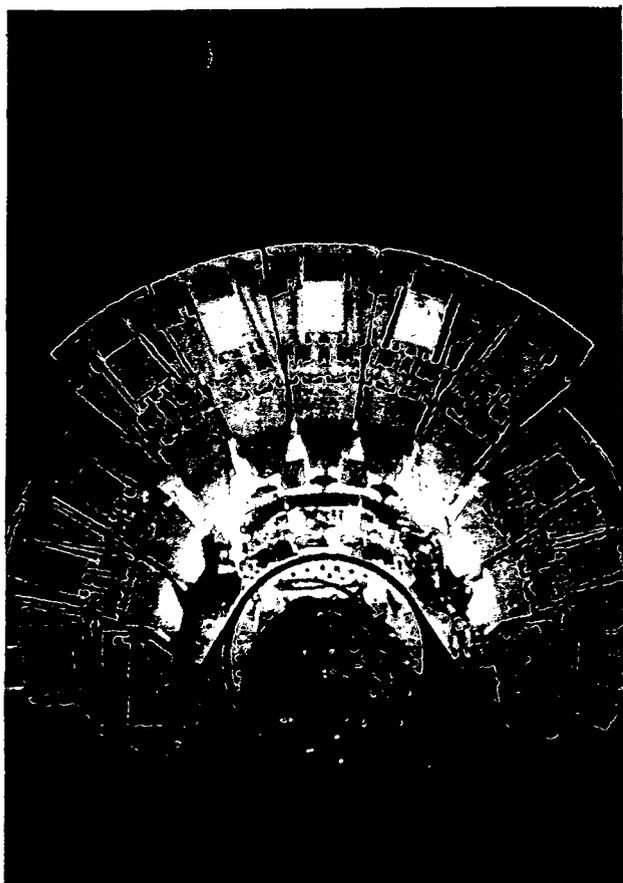
PREPARATION D'UNE VOLEE DE TIR A L'EXPLOSIF

Le creusement au tunnelier

Pour sa part, la solution mécanisée, partielle ou totale, ne sera retenue que si ses avantages sont assez évidents pour compenser le manque d'expériences effectuées de creusement au tunnelier dans les conditions propres au tunnel de base.

Ce type de méthode se caractérise par une organisation industrielle des chantiers, avantage décisif par rapport au creusement traditionnel à l'explosif, et ayant de nombreuses autres conséquences favorables : vitesse d'exécution, diminution du soutènement, économie financière globale, meilleures conditions de travail.

Le développement important de ce type de méthode ces dernières années, phénomène que l'on peut considérer comme irréversible, démontre son intérêt technique et économique.



LE CREUSEMENT AU TUNNELIER DANS LES TERRAINS MEUBLES OU LES ROCHES

La forme circulaire et régulière de l'excavation obtenue est de nature à minimiser les phénomènes de concentration des contraintes évoquées plus haut et donc à réduire le boulonnage du terrain.

Cependant, s'il est vrai que lorsque la méthode est bien "rodée", les rendements obtenus sont très élevés, ce qui la rend particulièrement bien adaptée aux très longs chantiers, elle reste sensible aux variations des conditions géologiques.

Dans les massifs hétérogènes de qualité médiocre il n'est pas rare de voir l'avancement varier d'un jour à l'autre d'un facteur dix, et dans les cas extrêmes, des arrêts prolongés de chantier ne sont pas à exclure. Si de tels incidents se répètent trop souvent, ils peuvent conduire à un dépassement irrémédiable des coûts et des délais.

Or, la traversée de zones délicates, notamment de zones broyées lors du franchissement des contacts entre grandes unités structurales, est tout à fait prévisible dans le contexte géologiques du tunnel de base.

D'autres difficultés inhérentes aux très fortes couvertures sont prévisibles : fortes convergences, maîtrise des éventuelles poussées induites par la tectonique résiduelle, maîtrise des venues d'eau sous forte pression, refroidissement supérieur à celui nécessaire en méthode traditionnelle à cause de la puissance thermique dégagée par les moteurs des machines de creusement,...

Par conséquent, si un creusement mécanisé devait être retenu, il devrait être précédé par une étude technique très sérieuse associant constructeurs de tunneliers et entreprises de génie civil dans le but de lever un certain nombre d'incertitudes car, l'expérience actuelle en matière de tunneliers sous forte couverture est limitée à des diamètres sensiblement inférieurs à ceux du tunnel de base (diamètre inférieur à 4 m, alors qu'il faudrait ici des diamètres de l'ordre de 9 à 11 m. Cela pourrait par exemple prendre la forme d'un concours technique qui pourrait intervenir assez rapidement et se faire en parallèle avec le creusement de galeries de reconnaissance.

Dans les documents présentés et pour les estimations réalisées, la géométrie circulaire proposée pour les ouvrages correspond bien aux méthodes de creusement faisant appel aux tunneliers. Elle est également parfaitement adaptable pour un creusement à l'explosif.

Les soutènements et les revêtements

Le soutènement serait un boulonnage du terrain qui par sa capacité de déformation et son caractère modulable semble être le mieux adapté au projet.

Le revêtement serait constitué d'anneaux de béton coulés à grande distance du front de taille, après stabilisation des déformations.

Il a en effet été considéré que, sous les très fortes couvertures, l'action des décompressions de terrain est telle qu'un revêtement non déformable, même très épais ne pourrait pas résister aux premières sollicitations et serait disloqué.

Aussi paraît-il nécessaire de mettre en place le soutènement habituel par boulons utilisé dans les méthodes non mécanisées de creusement des tunnels au rocher, suivi d'un revêtement différé en béton.

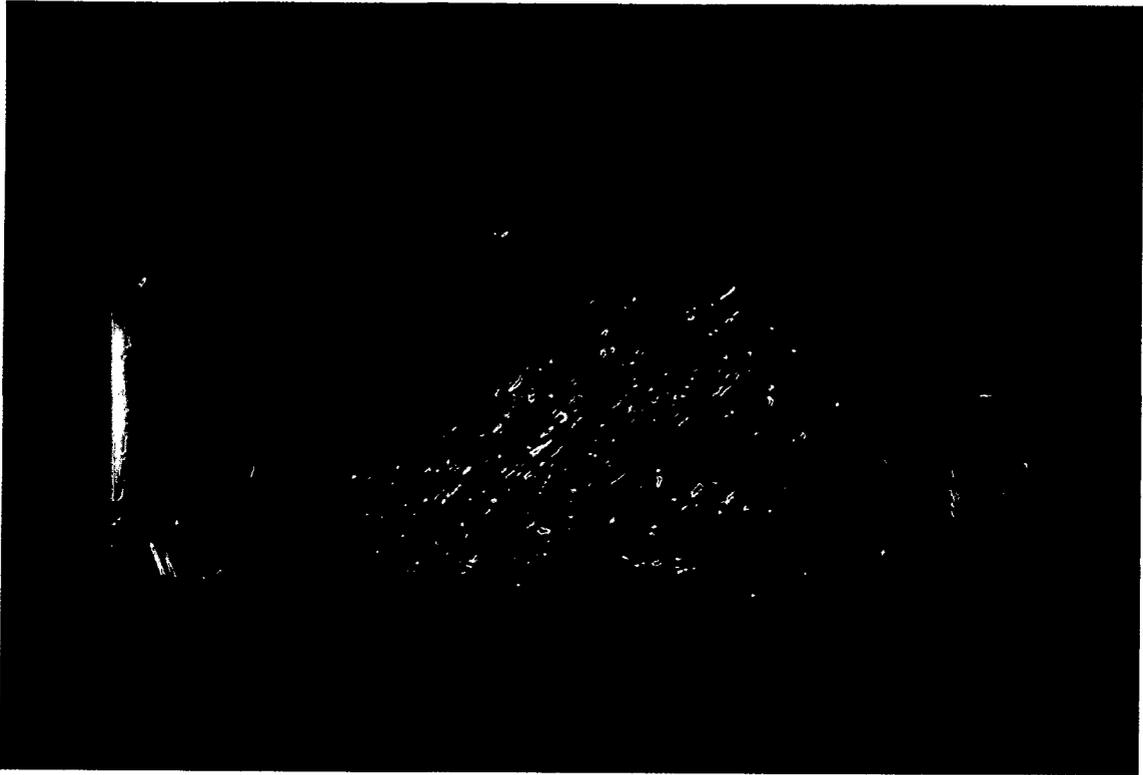
Ce type de soutènement communément appliqué dans les chantiers de creusement à l'explosif est tout à fait compatible avec un creusement au tunnelier dans la mesure où le problème de l'appui des vérins peut être résolu par des patins radiaux s'accrochant latéralement sur le terrain.

La desserte des chantiers

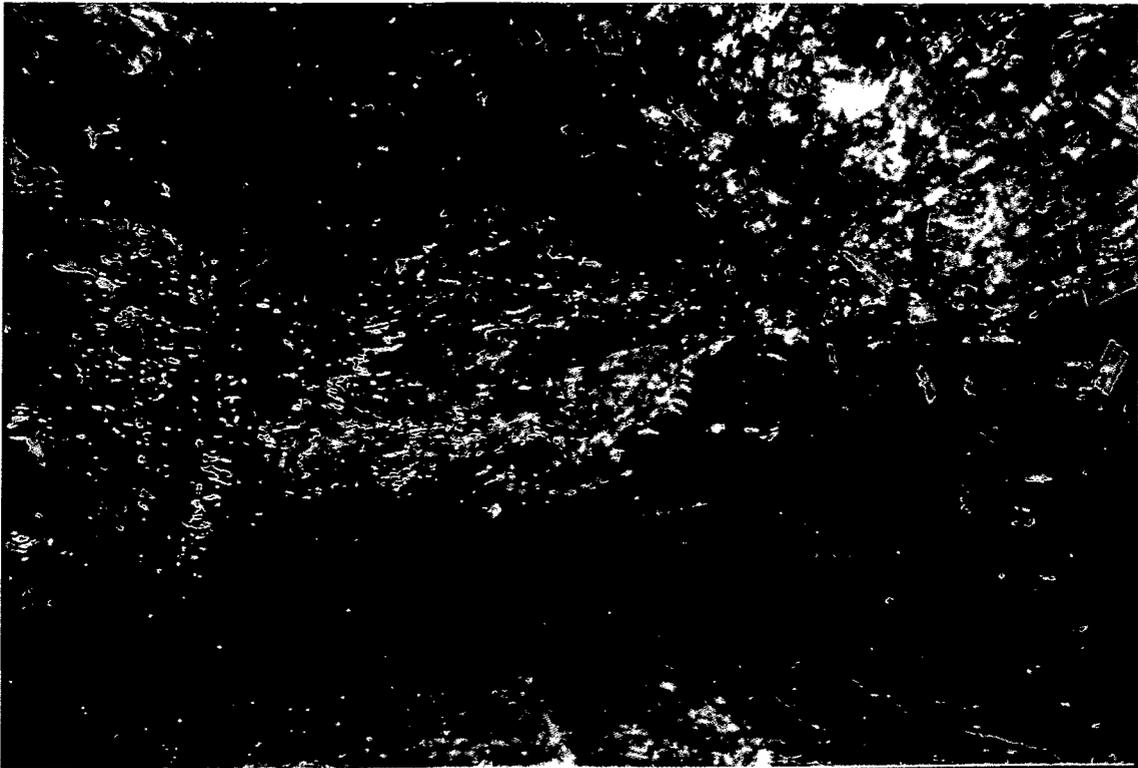
Elle se ferait par des descenderies routières de gabarit équivalent à celui des tunnels ferroviaires, réparties de manière à avoir des longueurs d'attaque n'excédant pas 12 km.

L'évacuation des déblais lors du creusement des descenderies se ferait par des dumpers à moteur diesel, éventuellement par des convoyeurs à bande.

Après leur réalisation, les descenderies seraient cloisonnées et aménagées de façon à assurer un grand nombre de fonctions : l'amenée et le retour d'air nécessaire à la ventilation, l'évacuation des déblais par convoyeur à bandes logé dans le compartiment air vicié, l'amenée des personnels et des matériaux par véhicules routiers circulant dans le compartiment air neuf, le passage de divers fluides et de l'énergie. L'évacuation des déblais et la desserte du chantier entre la base de la descenderie et le front de taille se feraient par trains de berlines.



SOUTENEMENT PAR CINTRE



SOUTENEMENT PAR BOULONNAGE

Les points singuliers

L'annexe 6 aborde le cas de la tête côté Saint-Jean-de-Maurienne, dans un cône de déjection, le passage des failles, le passage de la zone de houiller, les terrains très durs, les ouvrages particuliers (rameaux, communications pair-impair,...), les venues d'eau.

LA NECESSITE DE GALERIES DE RECONNAISSANCES

Afin de maîtriser au mieux, les coûts, les délais et les conditions de sécurité lors de la réalisation du projet, il convient d'avoir la meilleure connaissance possible de l'environnement géologique.

Les reconnaissances déjà réalisées durant les années 1990 à 1992 ont comporté des sondages classiques et des méthodes géophysiques. Elles avaient pour objectif de connaître les structures géologiques générales et d'orienter les choix en vue d'optimiser les tracés.

Cependant, le caractère ponctuel des sondages et la précision des méthodes géophysiques liés aux étalonnages, toujours délicats dans des formations structurellement complexes comme les Alpes, limitent la portée des renseignements fournis. Elles doivent donc être relayées, une fois les grandes options du projet définies, par des reconnaissances plus précises et plus fiables, au droit du futur ouvrage dans les zones significatives.

Or, il n'est pas envisageable, compte tenu des épaisseurs de couverture et des difficultés d'accès, de procéder à des investigations par forages à partir de la surface, comme cela se pratique habituellement, avec une densité de forages suffisante pour avoir une bonne information géologique. La distance nécessaire entre sondages (quelques hectomètres) montre le caractère irréaliste d'une telle approche.

Aussi est-on amené, dès maintenant, à envisager le creusement de galeries de reconnaissances, en des points judicieusement choisis du projet.

En constituant une sorte de modèle réduit du tunnel (tout en se méfiant de l'effet d'échelle), la galerie de reconnaissance est le seul véritable moyen d'éviter des choix techniques inadaptés aux conditions de réalisation du tunnel. Elle serait donc le support concret nécessaire à la réflexion technique sur les tunneliers évoquée plus haut.

Il n'est peut être pas utile de réaliser ces galeries sur l'ensemble du projet et on pourrait se contenter d'explorer les zones potentiellement critiques.

Celles-ci sont représentées pour une grande part dans les formations triasiques du secteur de Modane où de surcroît pourraient être reconnus les terrains où sera implantée la gare, ainsi que le franchissement de l'Arc. Une galerie dans ce secteur occasionnerait aussi une anticipation des travaux utile au respect des délais. Le même avantage est souhaitable dans le secteur du Val Clarea où l'on pourrait tester le comportement de l'excavation sous très forte couverture et dans les zones supposées être de température très élevée. Enfin, les formations du Houiller dans lequel on peut craindre des horizons plastiques générant des difficultés de construction nécessiteraient aussi une reconnaissance de ce type qui pourrait être menée à partie de la descenderie de la Praz.

Dans les zones où une galerie pilote de petit diamètre (a priori 4 m) aura déjà été réalisée au tunnelier, les ouvrages seront creusés autour de cette galerie par alésage, soit à l'explosif, soit au moyen d'un tunnelier aléseur. Une difficulté particulière sera liée à la présence du soutènement de la petite galerie qui devra être conçu en conséquence (boulons cassants, voire absence totale de soutènement si cela est possible). Mais généralement, la présence de la galerie permettra des cadences de creusement de l'ouvrage principal plus élevées.

Le creusement de galeries de reconnaissance doit être prévu dans la prochaine phase d'études du projet.





IX ASPECT ENVIRONNEMENTAL

Dès ce stade des études de faisabilité, il est apparu déjà nécessaire d'étudier certains aspects particulièrement importants, ayant une incidence notable sur l'environnement. Ils concernent essentiellement les problèmes hydrologiques, l'organisation des chantiers, la pollution atmosphérique et l'utilisation des matériaux extraits des fouilles.

Dans la présente étude, ces problèmes sont traités au niveau des principes, et les conclusions pourront servir de base de réflexion à l'étude environnementale ultérieure prévue par les procédures propres aux études préliminaires.

Il convient, en outre, de noter que le problème de l'utilisation des matériaux excavés et celui de l'organisation des chantiers ne peuvent être traités exhaustivement que dans le contexte des projets intéressant l'ensemble de la liaison. Pour ces aspects les problématiques sont en effet intimement liées : l'objectif général est dans ce cas l'optimisation de l'équilibre entre les lieux de production et de départ des matériaux (attaques de galeries, chantiers) et un ensemble de lieux d'utilisation ou de mise en dépôt (autres chantiers, décharges). Il apparaît ainsi évident que pour ces questions on ne peut pas se limiter au seul projet de tunnel de base, mais qu'il faut considérer pour le moins les projets ferroviaires limitrophes (Lyon - Saint-Jean-de-Maurienne et Susa-Turin) et, en cas de besoin, le contexte régional dans lequel ces projets vont s'inscrire.

PROBLEMES HYDROGEOLOGIQUES

Dans ce domaine les risques d'impact peuvent concerner l'assèchement des sources, les interférences avec d'éventuelles circulations thermales, la pollution des eaux.

- L'assèchement des sources ne représente un risque réel que dans les secteurs de faible couverture qui sont extrêmement limités dans le cas de cet ouvrage. En revanche, il conviendra d'être particulièrement vigilant aux déséquilibres hydrogéologiques locaux que pourrait occasionner le drainage des eaux par la galerie, en particulier au droit des zones tectoniquement perturbées.

- Il n'existe pas de sources thermales exploitées entre St-Jean-de-Maurienne et Susa.
- L'organisation et le déroulement des chantiers prévoiront des mesures préventives (décantation et enlèvement des déchets entreposés) pour éviter tout risque de pollution des eaux pendant la durée des travaux.
- Il pourrait être envisagé d'utiliser l'interception d'eaux potables, surtout dans la zone du houiller, pour alimenter les villages avoisinants.

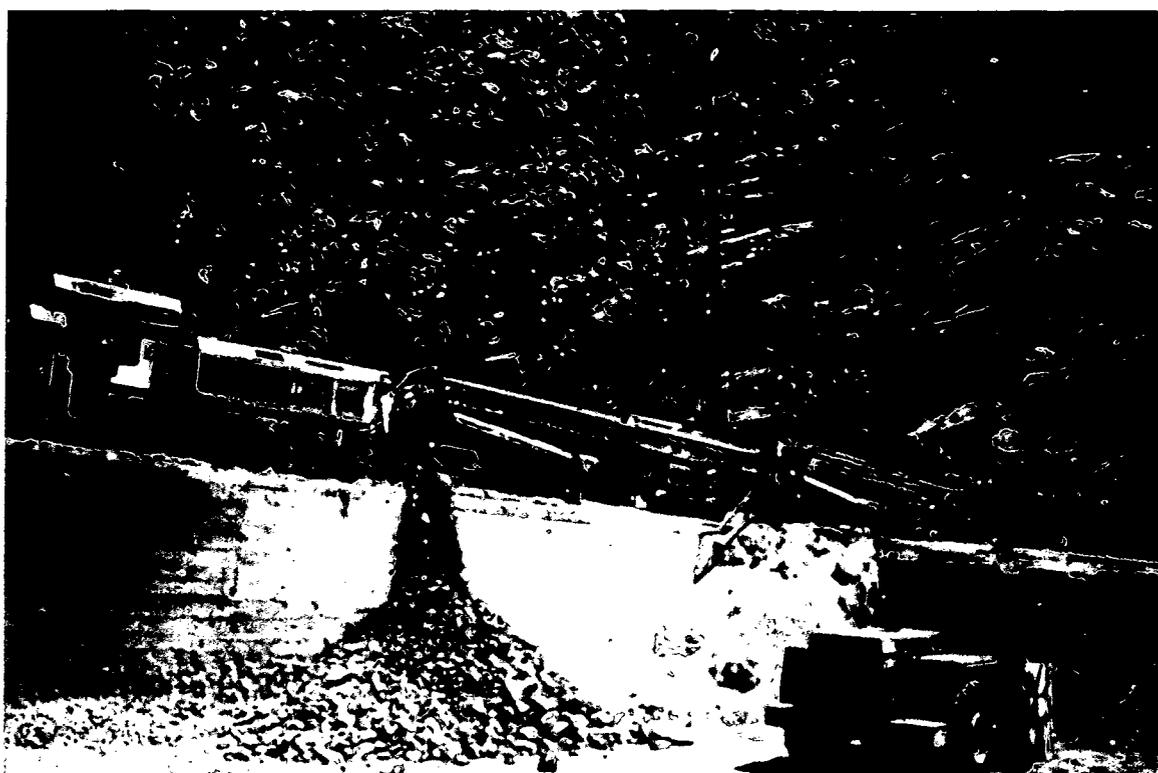
ORGANISATION DES CHANTIERS

Cette question devra faire l'objet d'une analyse attentive. On veillera au respect de l'environnement de la descenderie de la Praz; la tête de la descenderie de Val Clarea méritera à fortiori une attention particulière dans le domaine de la perturbation et de la reconstitution du site.

Le problème des transports durant les travaux doit être associé à celui de l'organisation des chantiers. Cet aspect intéresse toutes les attaques et leur liaison avec les lieux de décharge, mais intéresse également les chantiers de travaux relatifs aux autres tronçons de la liaison Lyon - Turin qui seront en activité en même temps. Le problème doit donc être étudié globalement pour l'ensemble de la liaison.

LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

A priori les problèmes de pollution de l'air sont pratiquement nuls en phase d'exploitation ; durant les travaux, des mesures seront prises à l'égard des chantiers eux-mêmes et également le long des parcours des véhicules routiers de transport aux décharges.



MARINAGE PAR BANDE TRANSPORTEUSE

UTILISATION DES MATERIAUX EXCAVES

C'est sans aucun doute le problème le plus important à résoudre compte tenu de la dimension de l'ouvrage. On peut citer pour le seul tunnel de base quelques chiffres significatifs :

- longueur à excaver : 120 km (y compris 12 km environ de descenderies)
- section excavée pour un tube à voie unique : 75 m²
- volume en place : 9 millions de m³
- volume foisonné : 12 millions de m³

Ces 12 millions de m³ seront extraits en 4 années environ, une fois achevées les galeries de reconnaissance, dans l'hypothèse de planning la plus favorable. La quantité de marinage en provenance de chaque attaque sera approximativement de :

- tête Saint-Jean-de-Maurienne	:	1,4	millions de m ³
- attaque Saint-Martin-de-la-Porte	:	1,8	millions de m ³
- attaque de La Praz	:	1,6	millions de m ³
- attaque de Modane	:	3,4	millions de m ³
- attaque de Val Clarea	:	1,7	millions de m ³
- attaque de Braida Venaus	:	1,5	millions de m ³
- tête Susa	:	0,7	millions de m ³

D'une manière générale tous ces matériaux ne devront pas être mis en décharge et une partie pourra être réemployée utilement, moyennant un retraitement (concassage, criblage,...) soit pour les besoins du projet de tunnel ou des projets ferroviaires contigus (Lyon - Saint-Jean-de-Maurienne, Susa - Turin), soit pour d'autres besoins à caractère régional.

Un plan d'affectation des matériaux issus du tunnel de base et des descendries d'attaque intermédiaires est suggéré sur les tableaux ci-joints, mais il ne peut en aucun cas être établi, même au niveau d'une étude de faisabilité, sans prendre en compte également les quantités extraites des tronçons encadrants (Montmélian - Saint-Jean-de-Maurienne et Susa-Turin) et leurs besoins en matériaux inertes.

De façon générale, les principales possibilités de réemploi sont :

- des granulats pour des conglomerats à liant ciment ou bitume (calcaires, dolomie, quartzite et gneiss) ;
- des produits pour ballast ferroviaire (gneiss) ;
- des matériaux pour les corps de remblais (éboulis, flysch, calcschistes, schistes et grès du houiller, etc...).

Globalement, on peut escompter obtenir :

- environ 6 millions de m³ de matériaux de bonne qualité pouvant être utilisés comme composants internes des bétons ou dans le ballast ferroviaire ;
- environ 5 millions de m³ de matériaux de bonne qualité pouvant être utilisés dans des remblais.

Ces matériaux pourraient trouver leur emploi dans le cadre du présent projet ou d'autres projets, ou être mis en dépôt, éventuellement en attente d'un emploi différé.

Il resterait une quantité relativement faible (0,4 à 1,2 millions de m³) d'anhydrites et de gypses qui par leur nature chimique et leur solubilité ne sont adaptés ni pour les bétons (agressivité des sulfates) ni pour les remblais (matériaux solubles).

PARTIE OUEST (de St Jean De Maurienne à Modane)

Longueur concernée du projet : 22,4 km

Volume total de déblais (foisonnés) 5,1 Mm3

CLASSES DE LITHOLOGIE	QUANTITE DE DEBLAIS		CARACTERISTIQUES	UTILISATION POTENTIELLE DES DEBLAIS (m3)			
	m3 (x 1000)	%		Béton	Remblais	Ballast	Dépôts
Eboulis (750 m)	170	3	- Texturale - Chimie, minéralogie dominante - Résistance mécanique - hétérogène - hétérogène - faible	X	XX		
Flysch (3050 m)	685	13,5	- schisteuse - zones gréseuses - moyenne		XX		
Anhydrite et cargneules possibles (870 m)	190	4	- indifférenciée - sulfate (*) - mauvaise à médiocre				X
Calcschistes (1360 m)	300	6	- schisteuse - hétérogène - moyenne		XX		
Calcaires (350 m)	160	3	- litée - carbonates - moyenne	XXX sauf silix	XXX		
Dolomies et Argiles (140 m)	30	1	- hétérogène				X
Schistes (2200 m)	490	9,5	- schisteuse - silice, charbon - moyenne		X		X charbon
Schistes et Grès (6000 m)	1300	25,5	- hétérogène - silice - moyenne à élevée	X grès	XX		
Grès (La Praz) et Gneiss (Sapey) (7900 m)	1760	34,5	- litée et métamorphique - silice - élevée	XX	XXX	X sauf schistes	
TOTAL VOLUME MARINAGE	5085	100%					

(*) ANHYDRITES - Sulfates; risques de dissolution (Gypses); agressif vis à vis des bétons.

PARTIE EST (de Modane à Susa)

Longueur concernée du projet : 31,7 km

Volume total de déblais (foisonnés) 7,1 Mm3

CLASSES DE LITHOLOGIE	QUANTITE DE DEBLAIS		CARACTERISTIQUES	UTILISATION POTENTIELLE DES DEBLAIS (m3)			
	m3 (x 1000)	%		Béton	Remblais	Ballast	Dépot
Micaschistes (5 à 7 km)	1120 à 1570	16 à 22	- Texturale - Chimie, minéralogie dominante - Résistance mécanique - plus ou moins schisteuse - mica, silice - élevée		XX		
Gneiss (3 à 5 km)	670 à 1120	9,5 à 16	- litage métamorphique - silice - élevée	XX	XXX	XXX	
Quartzites (1 à 1,7 km)	220 à 380	3 à 5,5	- massive, + ou - fracturée - 100 % silice - élevée	XXX	XXX	X	
Dolomies (1 à 1,7 km)	220 à 380	3 à 5,5	- litée - carbonates - élevée	X chimie	XXX		
Anhydrite (1 à 1,7 km)	220 à 380	3 à 5,5	- hétérogène - sulfate (*) - moyenne				X
Schistes Lustrés (2 à 4 km)	450 à 900	7 à 14	- schisteuse - hétérogène - moyenne à élevée		XXX		
Gneiss (Ambin) (14,5 km)	3260	45	- litage métamorphique - silice - élevée	XX	XXX	XXX	
Roches vertes (0,2 km)	45	0,5	- plus ou moins schisteuse - serpentine - moyenne à élevée		X		X
TOTAL VOLUME MARINAGE	7105	100%					

(*) ANHYDRITES - Sulfates; risques de dissolution (Gypses); agressif vis à vis des bétons.

XXX ==> Utilisation très favorable

XX ==> Utilisation Favorable

X ==> Utilisation moyennement favorable

Sites potentiels pour les décharges côté français

Côté français le volume de déblais foisonnés extraits du tunnel sera de l'ordre de 8 millions de m³. Pour la part qui devrait être mise en dépôt, des premiers contacts ont été pris avec les administrations locales concernées (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement et Direction Départementale de l'Équipement de la Savoie). Il ressort de ces contacts des potentialités qui devront être validées par des études approfondies (sondages, explorations de mines, études paysagères...).

Parmi les sites identifiés, on notera :

- Aiton : remblaiement d'une ancienne gravière utilisée par l'autoroute A43 (4 millions de m³)
- Barouchat près d'Aiguebelle : futur site d'emprunt de l'autoroute A43 Maurienne (0,5 million de m³)
- La Chapelle : carrière éventuellement réactivée pour les travaux de l'autoroute A43 Maurienne (0,5 millions de m³)
- Saint-Jean-de-Maurienne : besoins en corps de remblai pour l'autoroute A43 de l'ordre de 1 million de m³, comblement de carrières de gypse, merlons de protection au pied du Rocheray
- Secteur de Modane, au-delà des anciennes usines St-Gobain.

D'autres possibilités existent, liées :

- au comblement d'anciennes gravières réparties pour l'essentiel dans la vallée de l'Isère entre Montmélian et Albertville (après accord des municipalités concernées sur cette solution) ;
- au recours à une méthodologie "emprunt-dépôt" pour le site d'emprunt envisagé par la S.N.C.F. en rive gauche de l'Isère pour les remblais T.G.V. dans le secteur les Marches-Montmélian ;
- à une modification possible du type de réaménagement prévu actuellement pour certaines carrières alluvionnaires en exploitation (comblement et remise en état agricole au lieu de plan d'eau systématique).

La poursuite des réflexions associera nécessairement les communes concernées de façon étroite.

Sites potentiels pour les décharges côté italien

Côté italien le volume de déblais foisonnés extraits du tunnel sera de l'ordre de 4 millions de m³. Les possibilités de mise en dépôt, à décider avec les administrations locales, ont été recherchées dans des secteurs limitrophes du projet, le long de la vallée de la Dora Riparia, en tenant compte des répercussions sur la physionomie actuelle du territoire. Les localisations identifiées sont les suivantes :

- Trois à l'ouest de Susa entre Val Clarea et Val Cenischia ;
- Quatre autour de Bussoleno ;
- Trois entre les localités de San Didero et San Antonino di Susa.

L'étude de la mise en dépôt des matériaux excavés devra faire l'objet d'un approfondissement, non seulement sous l'angle environnemental, mais également dans les domaines géotechniques et géomorphiques qui devront être explorés soigneusement.



X DUREE DE CONSTRUCTION DU TUNNEL DE BASE

L'annexe 7 présente les schémas synoptiques du projet et les différents plannings envisagés.

Chacun des synoptiques du projet (configuration nord et configuration sud) indique l'implantation des attaques intermédiaires (fenêtres) pour la réalisation des travaux de creusement, l'implantation de la gare de service de Modane et des ouvrages de communication voie impaire/voie paire, et l'implantation d'une descenderie ferroviaire éventuelle dans le cas d'un phasage des travaux (mise en service partielle). La position des fenêtres intermédiaires est liée aux contraintes de planification des travaux et à la topographie.

La planification des travaux a été envisagée aussi bien pour le tracé nord que pour le tracé sud selon trois hypothèses différentes d'organisation des chantiers.

- hypothèse 1 : 6 ans de travaux de génie civil avec trois attaques intermédiaires (La Praz, Modane, Braida),
- hypothèse 2 : 4,5 ans de travaux de génie civil entre La Praz et Susa, et mise en exploitation anticipée en première phase de ce tronçon de tunnel de 35 km (avec une rampe de 35 ‰ à la Praz), soit pour T.G.V. seul, soit pour rames à grande vitesse + fret. Cette hypothèse suppose la réalisation de cinq attaques intermédiaires ; le surcoût correspondant est de 1,2 à 1,4 Milliard de Francs par rapport à l'hypothèse 1 pour le seul génie civil,
- hypothèse 3 : 4,5 ans de travaux de génie civil pour l'ensemble du tunnel avec les cinq attaques intermédiaires ; le surcoût correspondant est de 1,1 Milliard de Francs, par rapport à l'hypothèse 1.

Les plannings ont été établis selon les hypothèses suivantes :

- méthode traditionnelle de creusement à l'explosif, sauf pour les galeries de reconnaissance en diamètre 4 m environ, étant entendu que l'emploi de tunneliers, s'il était adopté, ne devrait pas logiquement conduire à une augmentation des délais de construction,
- travail 365 jours par an, à raison de 3 postes par jour, mais avec seulement la prise en compte de 300 jours effectivement productifs pour intégrer les temps d'installation, les travaux annexes, les ralentissements, voire les arrêts de chantier qui pourraient intervenir à la suite de difficultés diverses (venues d'eau, zones broyées, difficultés d'exhaure en attaque descendante).

Ces hypothèses conduisent à des avancements de :

- 2100 m/an par front d'attaque pour le creusement principal,
- 3500 m/an pour l'alésage à l'explosif d'une galerie de reconnaissance creusée au tunnelier,
- 4500 m/an pour une galerie de reconnaissance de diamètre extérieur 4 m creusée au tunnelier.

Des cadences de 1000 m/an ont été adoptées pour la traversée du cône de déjection de Saint-Julien-Mont-Denis, avec une simulation réduisant encore de moitié cet avancement si les difficultés étaient plus redoutables. Cela n'aurait a priori pas d'incidence sur la date de fin des travaux, sous réserve de mise en oeuvre de moyens supplémentaires à partir de l'attaque intermédiaire de Saint-Martin-de-la-Porte dans le cas de l'hypothèse 3.

On peut donc considérer que les plannings ainsi établis prennent en compte une marge "raisonnable" d'aléas et intègrent les travaux d'installation et de replis. Cependant l'aléa très important occasionnant des arrêts de chantier durables (supérieur à 6 mois) n'est pas intégré.

L'examen des plannings met en évidence les deux points suivants :

- d'une part l'immense intérêt que représente la fenêtre intermédiaire du Val Clarea côté italien, malgré sa longueur de 4 900 m ; c'est elle qui permet de réduire la longueur du tronçon central, situé sur le chemin critique du planning,
- d'autre part la nécessité d'anticiper les travaux des descenderies de Modane et du Val Clarea si l'on veut respecter dans les hypothèses 2 et 3 le délai de 4,5 ans pour les travaux de génie civil.

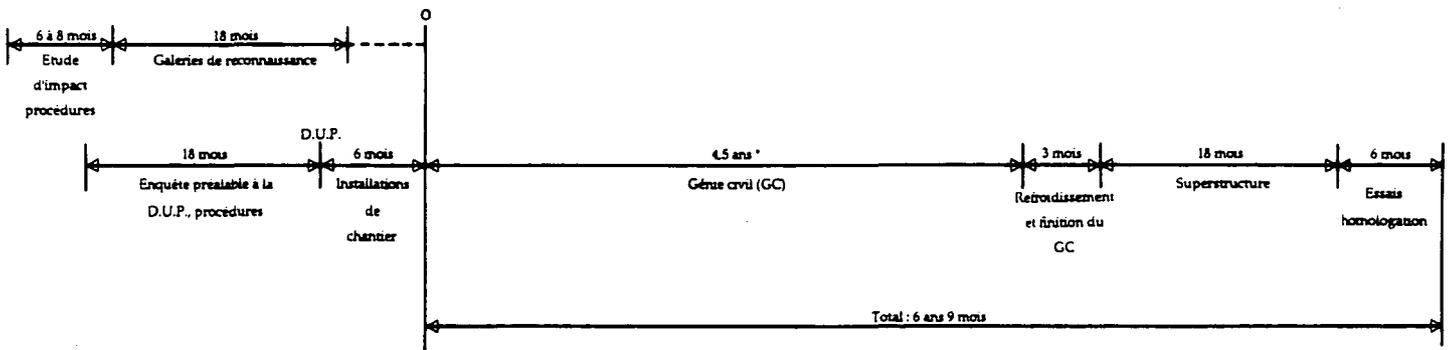
Cette anticipation des travaux pourrait s'intégrer dans le cadre de reconnaissances par galerie pilote. Pour des travaux de reconnaissances, ces descenderies sont particulièrement bien situées puisque celle du Val Clarea permettrait de connaître à l'avance le comportement des terrains sous la plus forte couverture et de vérifier les conditions de température que l'on rencontrera et que celle de Modane permettrait de reconnaître un secteur très hétérogène pour lequel nous disposons d'informations limitées. De surcroît, dans le cas du tracé nord, cette galerie permettrait aussi de reconnaître la gare de service de Modane et le franchissement de l'Arc.

Un planning d'ensemble simplifié de la construction et de l'équipement du tunnel de base a été dressé dans l'hypothèse 3 (durée du génie civil : 4,5 ans).

Il a été considéré que les galeries de reconnaissance seraient réalisées avec des tunneliers de réemploi dont le temps de montage s'inscrirait dans le délai de procédures préalables à ces ouvrages.

La durée de réalisation, une fois achevées les galeries de reconnaissance et les procédures d'utilité publique, est estimée à 6 ans et 9 mois.

Dans l'hypothèse 1 (durée du génie civil : 6 ans), elle serait de 8 ans et 3 mois.



* hors gros aléas de chantier

TUNNEL DE BASE. HYPOTHESE DE PLANNING SYNTHETIQUE



XI - COUT PREVISIONNEL DE LA LIAISON

METHODE D'ESTIMATION DU GENIE CIVIL DU TUNNEL DE BASE

Le génie civil du tunnel de base a été estimé en appliquant une méthode qui s'appuie sur une constatation générale selon laquelle une quinzaine de postes caractéristiques permettent d'approcher l'essentiel du prix de construction. Pour tenir compte de la sensibilité des postes liés au soutènement et aux conditions géologiques ont été définies 4 classes de soutènement par boulonnage, principalement fonction de la capacité autoportante des terrains auxquelles a été ajoutée une 5ème classe incluant des travaux confortatifs et des soutènements plus importants pour la traversée des zones difficiles.

A partir des éléments actuellement disponibles (géologie de surface, sondages, topographie), une répartition géographique de ces classes le long du projet permet une première approche de l'estimation. La répartition géographique des classes tient compte de la géologie supposée à l'altitude du tunnel, mais aussi des effets de grande profondeur qui se traduisent par une densification des boulons d'ancrage. L'estimation se fait alors moyennant des prix unitaires calibrés sur les résultats d'appel d'offres récents et d'une majoration systématique pour inclure les installations de chantier et les "coûts secondaires".

Diverses sommes à valoir variant de 15 %, pour les zones courantes, à 30 %, pour les ouvrages plus complexes telle la gare de service, couvrent les risques d'une interprétation trop optimiste des classes de soutènement et les inévitables imprécisions de programme.

Cette estimation vise aussi à couvrir par une majoration supplémentaire les baisses de productivité de la main d'oeuvre liées aux grandes longueurs (durée d'acheminement des personnels au front de taille) et aux grandes profondeurs (température ambiante réduisant le temps de travail).

Bien qu'ayant pour principal intérêt d'éviter une évaluation trop simpliste au moyen de ratios trop généraux, l'approche décrite ci-dessus ne peut prétendre constituer une véritable estimation du coût des travaux. En effet, outre l'environnement géologique dont la connaissance actuelle est basée sur l'extrapolation de données de surface, il existe beaucoup d'incertitudes ayant une grande influence sur les coûts.

Profil type A

Béton : 0.50 m
Béton projeté : 0.15 m
Boulons : L = 3.50 m, esp. = 2.00 m
répartis sur 180°

Profil type B

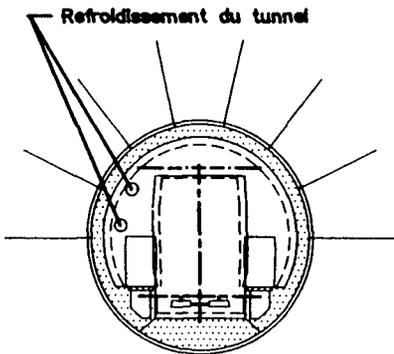
Béton : 0.60 m
Béton projeté : 0.25 m
Boulons : L = 4.00 m, esp. = 1.50 m
répartis sur 180°

Profil type C

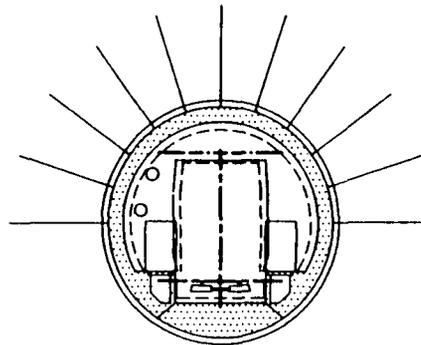
Béton : 0.60 m
Béton projeté : 0.30 m
Boulons : L = 4.50 m, esp. = 1.20 m
répartis sur 240°

Profil type D

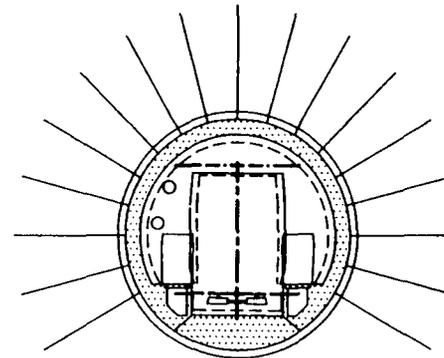
Béton : 0.70 m
Béton projeté : 0.30 m
Boulons : L = 5.00 m, esp. = 0.80 m
répartis sur 240°



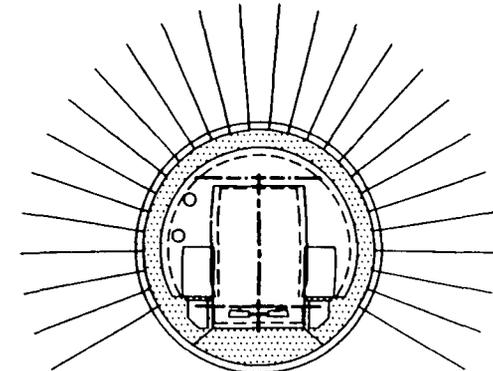
Section excavée : 67.00 m²



Section excavée : 73.00 m²



Section excavée : 74.50 m²



Section excavée : 78.00 m²

Ech. 1/20

On citera en particulier :

- les choix restant à faire pour les méthodes de creusement (traditionnelles à l'explosif ou totalement mécanisées) ;
- les lieux de mise en dépôt des déblais (les estimations prennent en compte un trajet moyen de 8 km ; pour 30 km le surcoût serait de l'ordre de 1,2 Milliard de Francs) ;
- le mode de conduite du projet : de type classique avec conception et exécution menées successivement ce qui va dans le sens d'une diminution des coûts directs de construction (hypothèse retenue) ou de type "conception/réalisation", ces opérations étant menées simultanément en vue de réduire les délais...

METHODE D'ESTIMATION DES LIGNES NOUVELLES D'ACCES

En vue de vérifier la faisabilité du projet, des tracés-tests ont été réalisés, ainsi qu'un pré-dimensionnement des ouvrages.

Sur ces bases des quantitatifs sommaires ont été établis et, à l'aide de ratios issus en particulier de l'expérience des lignes nouvelles déjà réalisées, une première approche des coûts d'investissements prévisibles a été faite.

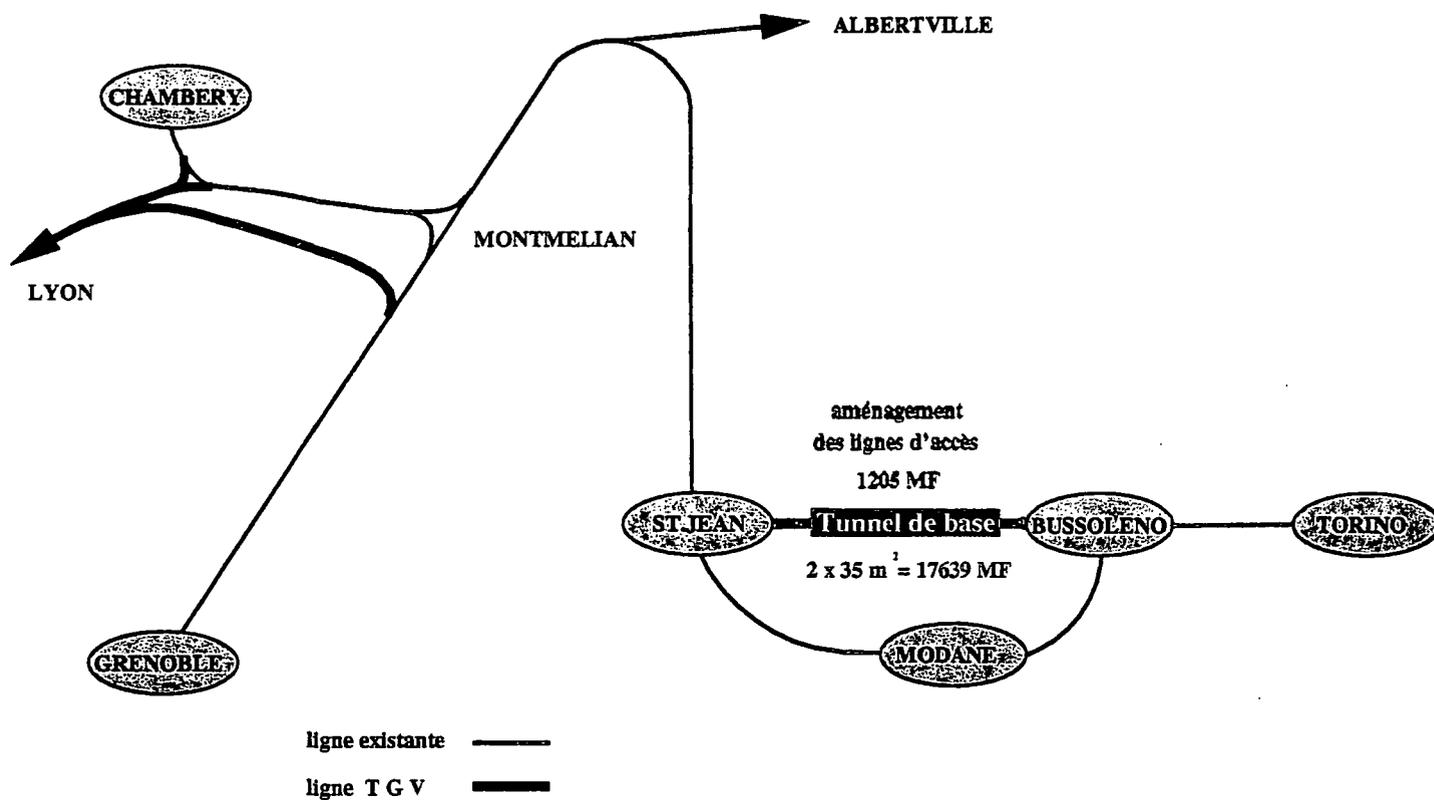
Ces coûts prennent en compte :

- les frais d'acquisition des terrains et de remembrement,
- les frais de libération des emprises,
- les terrassements,
- les drainages,
- les souterrains,
- les viaducs,
- les ouvrages d'art courants et spéciaux,
- les protections phoniques,
- l'équipement ferroviaire,
- les rétablissements de voiries,
- les aménagements paysagers,
- les clôtures,
- les frais généraux (frais d'administration générale, de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'oeuvre).

Pour les terrassements et pour les souterrains, les estimations prennent en compte les données géotechniques disponibles à cette étape de l'étude. En l'absence de résultat de sondages, ces postes de dépense réservent une part d'aléas importante.

TGV + FRET CLASSIQUE: SCENARIO DE BASE

- Côté français : utilisation des lignes existantes
- Tunnel de base : bitube (2 x 35 m²)
- Côté italien : utilisation des lignes existantes



Coût total H.T.,F.G. compris
avec tunnel de base (2 x 35 m²) : 18844 MF *

REMARQUE : Les faisceaux de ST-AVRE et BUSSOLENO sont intégrés au coût du tunnel de base franco-italien

* Prix exprimés à la valeur de janvier 1992 (estimation).

COUT PREVISIONNEL DES INFRASTRUCTURES

Les deux fiches présentées résument les estimations prévisionnelles, avec les réserves nécessaires notamment en l'absence de galeries de reconnaissance pour le tunnel de base, suivant les hypothèses de trafic suivantes :

1. Trains à grande vitesse + fret classique : hypothèse de base ne réservant pas l'autoroute ferroviaire
2. Trains à grande vitesse + fret classique : hypothèse réservant l'autoroute ferroviaire.

Les estimations sont effectuées hors taxes, frais généraux inclus, aux conditions économiques de Janvier 1992.

Pour l'estimation du tunnel de base, l'hypothèse de planning retenue a été l'hypothèse 3 (5 descenderies permettant de limiter à 4,5 années la réalisation du génie civil.

TGV + FRET CLASSIQUE

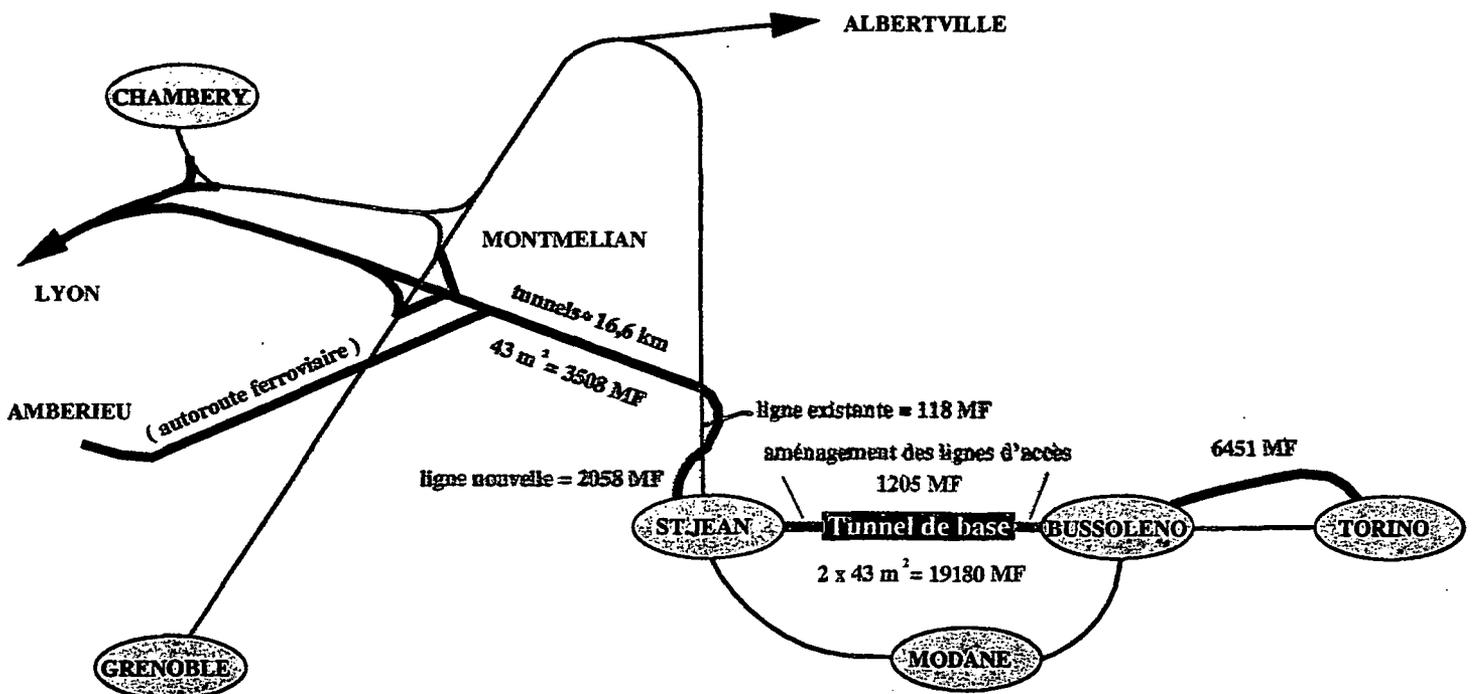
SCENARIO RESERVANT L'AUTOROUTE FERROVIAIRE

Côté français : - TGV sous BELLEDONNE : voie unique par monotube 43 m^2

- fret classique par la ligne existante dans la vallée.

Tunnel de base : - bitube ($2 \times 43 \text{ m}^2$)

Côté italien : - lignes mixtes avec tunnels de 82 m^2



ligne existante —
ligne TGV —

Coût total H.T., F.G. compris
avec tunnels de base $2 \times 43 \text{ m}^2$: 32520 MF *

REMARQUE : Les faîsseaux de ST-AVRE et BUSSOLENO sont intégrés au coût du tunnel de base franco-italien

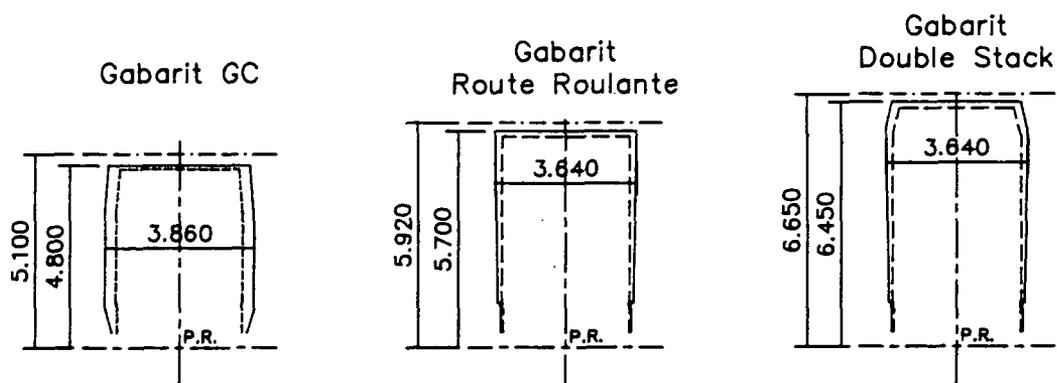
* Prix exprimés à la valeur de janvier 1992 (estimation).

XII - CAS PARTICULIER DE L'AUTOROUTE FERROVIAIRE

LES CARACTERISTIQUES DIMENSIONNANTES

Les caractéristiques particulières de l'autoroute ferroviaire pouvant avoir une incidence sur la conception de l'ouvrage et de ses équipements sont les suivantes :

- desserte cadencée à raison de 3 trains à l'heure 20 heures sur 24, dont 2 cadencés à la demi-heure,
- rames de 750 mètres susceptibles d'être couplées par 2 ou 3,
- gabarit supérieur au gabarit C,
- véhicules voyageurs affectés aux conducteurs de poids lourds intégrés dans chaque rame de 750 mètres,
- forte motorisation des rames,
- moteurs des camions supposés froids à l'entrée du tunnel (chargement remontant à plus d'une heure),
- transport de matières dangereuses exclu.



Ech : 0 1 2

----- Plan de contact caténaire

L'INCIDENCE SUR LA CONCEPTION DU TUNNEL DE BASE

Les caractéristiques de l'autoroute ferroviaire ne remettent pas en cause les avantages, tant pour la sécurité que pour les coûts et les conditions de réalisation, d'une solution bitube, sans galerie de service, avec gare intermédiaire souterraine.

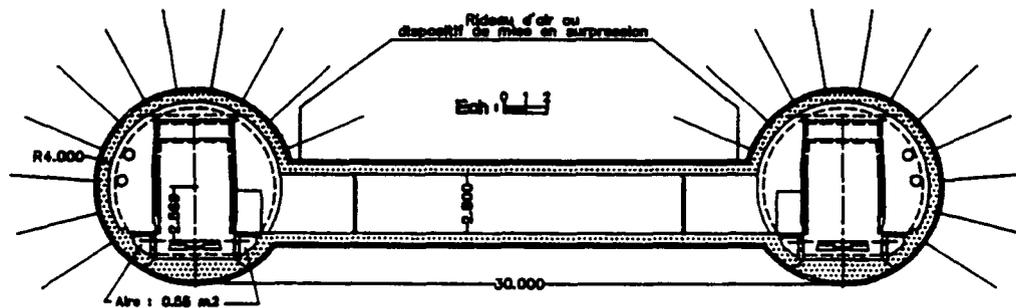
L'absence de moteurs de camions chauds évite le recours à des rames spécialement équipées pour la traversée du tunnel.

Comme dans l'hypothèse de base et sous réserve des hypothèses de calcul prises en compte, en attente du résultat des essais sur modèles physiques et en vraie grandeur, le bilan économique n'est pas favorable à la réalisation de rameaux de pistonement entre les deux tubes.

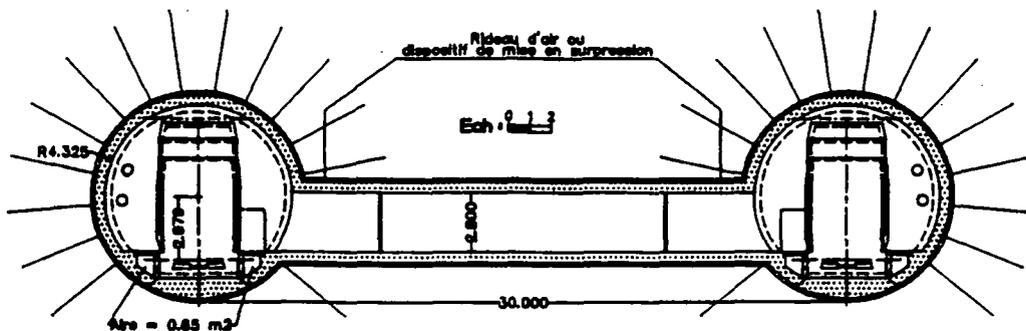
L'incidence de l'autoroute ferroviaire sur la conception de l'ouvrage concerne essentiellement :

- La section libre d'air qui, du simple fait du gabarit cinématique des convois, doit être de 43 m² minimum (compte-tenu également de l'encombrement des équipements caténaires), et de 52 m² minimum dans l'hypothèse "double stack".

Les essais sur modèles mathématique et physique, corrélés par des essais dans des tunnels existants, permettront d'optimiser cette section.

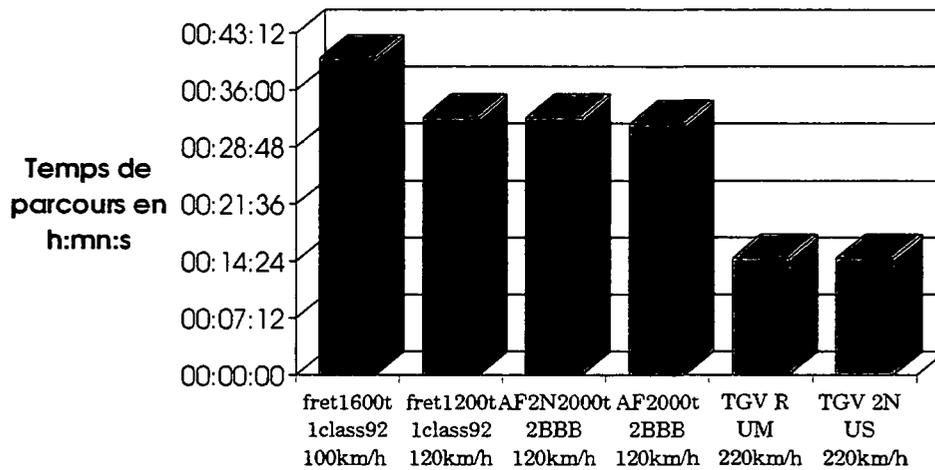


Section d'air : 43.00 m²



Section d'air : 52.00 m²

SECTION DU TUNNEL : 52 m²



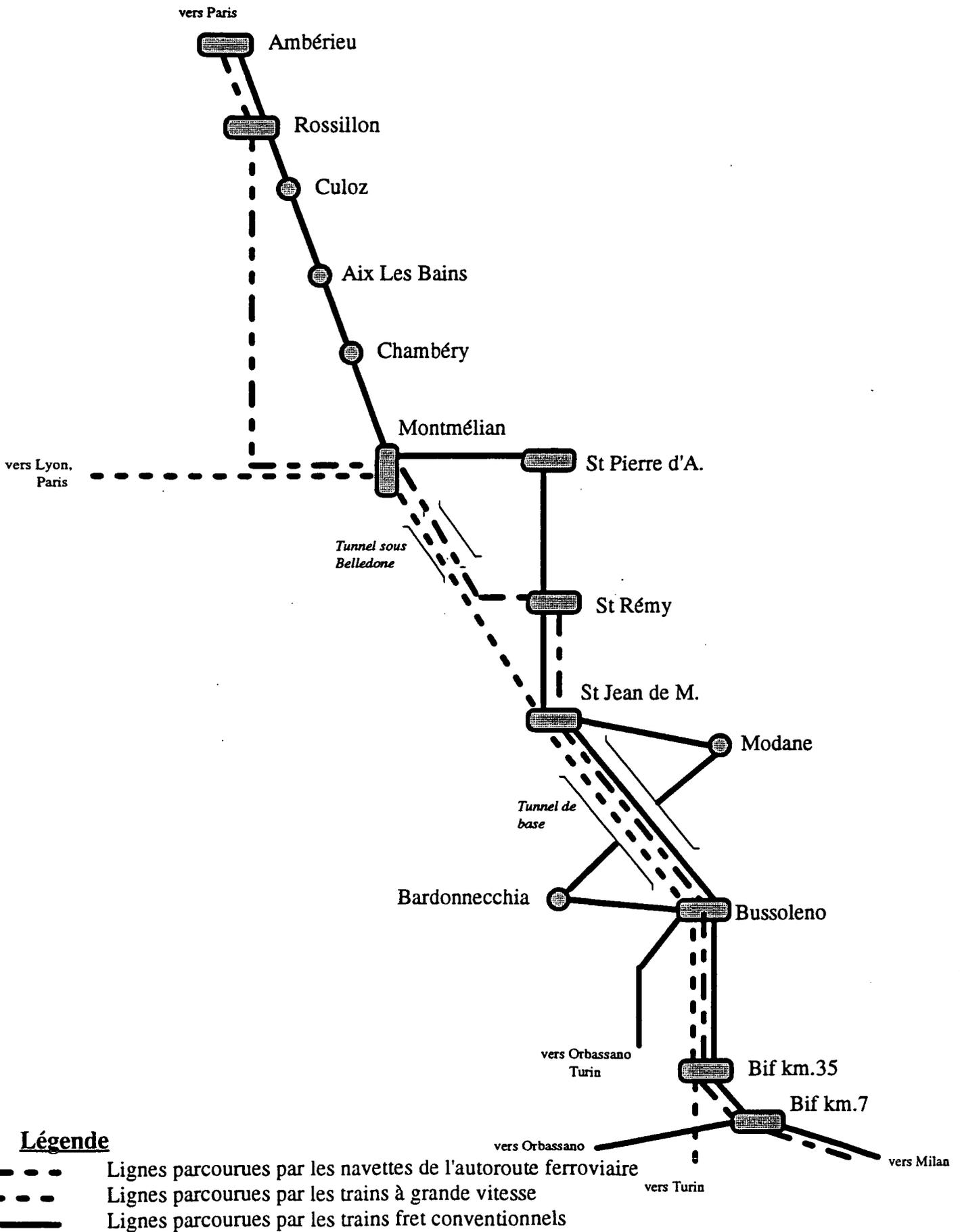
Notations : AF : Autoroute Ferroviaire
AF2N: Double stack

La gare de Modane dont les quais situés sur les voies directes devront mesurer 750 mètres utiles pour permettre l'évacuation des conducteurs d'une rame. La sécabilité des convois de l'autoroute ferroviaire permettrait en cas de besoin d'évacuer hors du tunnel les autres rames non sinistrées du train.

Les convois de l'autoroute ferroviaire sont considérés comme prioritaires sur les autres convois fret. En conséquence, les voies d'évitement restent destinées aux convois classiques et ni leur longueur, ni leur section libre, n'ont à être augmentées.

Les installations de désenfumage dont les débits devront être augmentés en fonction de la section libre d'air des tubes.

Les installations de refroidissement qui devront prendre en compte les apports calorifiques complémentaires dûs à l'hétérogénéité des convois et à la forte motorisation des rames autoroute ferroviaire.



LES LIGNES D'ACCES AU TUNNEL DE BASE

Les lignes actuelles n'offrent pas la capacité suffisante, même en l'absence de relèvement de la vitesse voyageurs, pour acheminer vers le tunnel de base, outre les rames à grande vitesse, les dessertes locales voyageurs et le fret classique, les rames de l'autoroute ferroviaire.

Le nombre de sillons à offrir, hors desserte locale, est de 185 dans le sens France - Italie (le plus critique).

Lignes d'accès côté français

De Montmélian à Saint Jean-de-Maurienne, trois hypothèses ont été examinées :

Accès de l'autoroute ferroviaire par la ligne actuelle mise au gabarit et électrifiée en courant alternatif 25000 volts, le trafic voyageurs à grande vitesse bénéficiant de son infrastructure propre.

On constate alors :

- un déséquilibre des charges entre la ligne nouvelle à grande vitesse et la ligne actuelle,
- que la section Montmélian - Saint Pierre d'Albigny (tronc commun à la desserte de la Maurienne et de la Tarentaise) serait très rapidement saturée,
- que les deux voies de la ligne actuelle entre Saint Pierre d'Albigny et Saint Jean-de-Maurienne seraient saturées à l'horizon 2015.

Tunnel commun bitube sous Belledonne, de Montmélian à Saint Jean-de-Maurienne, pour les rames voyageurs à grande vitesse et l'autoroute ferroviaire. Entre Saint Rémy-de-Maurienne et Saint Jean-de-Maurienne, les rames à grande vitesse bénéficient d'une infrastructure propre, et l'autoroute ferroviaire utilise la ligne actuelle mise au gabarit et électrifiée en courant alternatif 25000 volts.

On constate alors :

- un équilibre des charges entre la ligne nouvelle sous Belledonne, mixte, et la ligne classique par la vallée, entre Montmélian et Saint Rémy-de-Maurienne,
- la nécessité de réserver le triplement de la ligne classique entre Saint Rémy-de-Maurienne et Saint Jean-de-Maurienne.

Ligne nouvelle mixte grande vitesse voyageurs et autoroute ferroviaire par la vallée, de Montmélian à Saint Jean-de-Maurienne.

Du fait de la longueur du tronc commun à des circulations de vitesses différentes, les conditions d'exploitation sont nettement moins favorables que dans l'hypothèse précédente.

Les besoins en voies d'évitement sont, pour les trois hypothèses, de :

- 6 voies dans le sens France - Italie, dont 3 de longueur suffisante pour les navettes autoroute ferroviaire,
- 2 voies dans le sens Italie - France, de longueur adaptée à l'autoroute ferroviaire.

Lignes d'accès côté italien

De Susa à Turin, le quadruplement devra être réalisé dès la mise en service de la liaison, la nouvelle ligne étant affectée en priorité aux rames à grande vitesse voyageurs et aux rames de l'autoroute ferroviaire.

Le contournement marchandises de Turin doit également être réalisé dès la mise en service de l'autoroute ferroviaire et dégager le gabarit correspondant.

Le plan de voies de Bussoléo permet, pour les trains de fret conventionnels, l'utilisation éventuelle des voies de garage de la gare actuelle. C'est pourquoi, il n'est pas nécessaire de prévoir le même nombre de voies à Bussoléo "bis", situé sur ligne nouvelle, que côté français. Il faut, dans le sens France - Italie, 2 voies dont une de longueur suffisante pour y garer les rames autoroute ferroviaire. Dans l'autre sens, il faut 2 voies également, mais toutes deux d'une longueur suffisante pour y garer les rames autoroute ferroviaire.

La simulation graphique effectuée montre qu'il est possible de tracer sur la ligne nouvelle entre Susa et la bifurcation du KM 35 plus de 170 sillons par sens, ce qui est supérieur aux besoins de l'horizon 2020.

LA CAPACITE DU TUNNEL DE BASE

La simulation graphique effectuée en tenant compte des conditions de tracé des trains sur les lignes d'accès au tunnel de base donne, dans le sens France - Italie, 180 sillons (dont 3 trains à grande vitesse par heure) sous réserve de considérer :

- que la période de blanc travaux sur les lignes d'accès des trains à grande vitesse et autoroute ferroviaire au tunnel de base est dans le prolongement de celle du tunnel de base,

- qu'il n'est pas possible de tracer des marches fret à 100 km/h pendant les plages horaires de circulation conjointe trains à grande vitesse et navettes autoroute ferroviaire.

Les analyses effectuées selon les trois hypothèses d'accès côté français donnent à quelques sillons près les mêmes résultats soit, par sens, 40 rames à grande vitesse, 60 navettes autoroute ferroviaire et 80 fret. Il est donc possible de faire face aux besoins de l'horizon 2020. Par contre, au delà, la réserve de capacité du tunnel de base devenant insuffisante, il faudra envisager de faire transiter quelques trains fret de préférence limités à 100 km/h par l'ancien tunnel.

Pour inscrire, par heure et par sens, 3 trains à grande vitesse, 3 trains autoroute ferroviaire cadencés et 2 sillons fret à 120 km/h, un évitement de circulation par sens de longueur utile 750 mètres, en gare souterraine de Modane est suffisant.

On a examiné cependant s'il y avait intérêt à augmenter la longueur de la voie d'évitement de Modane pour la rendre apte à recevoir un train autoroute ferroviaire. Cette solution, outre son coût, n'est pas à conseiller car elle n'apporte pas de capacité supplémentaire et implique une dégradation du temps de parcours de l'autoroute ferroviaire, un décadencement de leur horaire et des conditions d'exploitation difficiles à gérer.

COUT PREVISIONNEL DE LA LIAISON

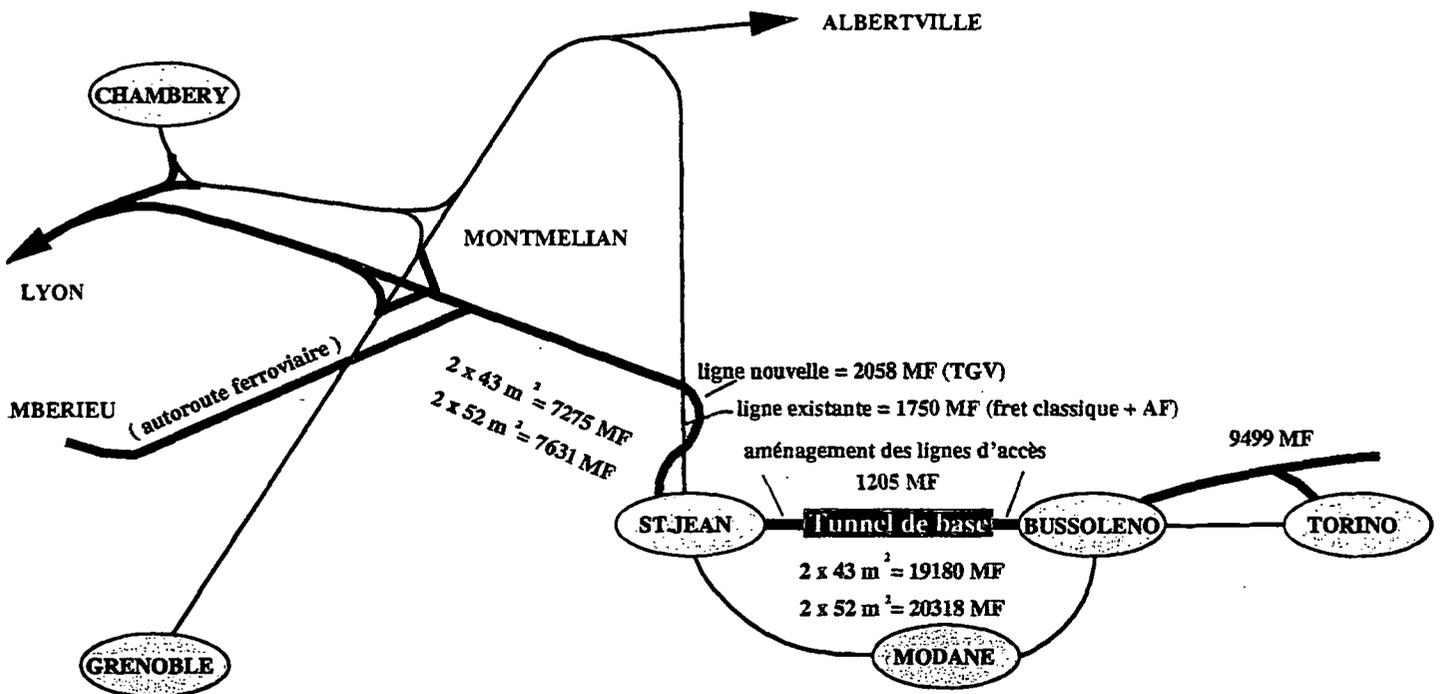
La fiche ci-après résume les estimations prévisionnelles, avec les réserves nécessaires notamment en l'absence de galerie de reconnaissance, avec ou sans option "double stack".

TGV + FRET CLASSIQUE

OPTIONS : a) AUTOROUTE FERROVIAIRE
b) DOUBLE STACK

Enveloppe des investissements envisageables:

- Côté français : - TGV + AF sous BELLEDONNE * bitube (2 x 43 m²)
* bitube (2 x 52 m²) (option deux niveaux)
- de Saint-Rémy à Saint-Jean TGV sur ligne nouvelle
AF sur ligne existante à 3 voies
- fret classique par la vallée
- Tunnel de base : * bitube (2 x 43 m²)
* bitube (2 x 52 m²) (option deux niveaux)
- Côté italien : - lignes mixtes, y compris shunt de TURIN, avec tunnels de 82 m²



ligne existante —
ligne TGV —

Coût total H.T., F.G. compris	
avec Autoroute Ferroviaire :	40967 MF *
option deux niveaux :	42461 MF *

REMARQUE : Les faisceaux de ST-AVRE et BUSSOLENO sont intégrés au coût du tunnel de base franco-italien

* Prix exprimés à la valeur de janvier 1992 (estimation).

XIII - PROPOSITIONS POUR LA POURSUITE DES ETUDES

La poursuite des études dans le cadre de l'établissement d'un Avant-Projet Sommaire devra concerner en particulier les domaines suivants, avec application au cas de l'autoroute ferroviaire :

Exploitation :

- Optimisation des modèles d'exploitation sur la base des trafics prévisionnels définitifs.
- Définition précise des installations, notamment pour les lignes d'accès.

Sécurité dans le tunnel de base :

- Examen de la problématique des rames de nuit et des rames à 2 niveaux.
- Approfondissement des études de ventilation et de désenfumage, notamment au niveau de la gare de service de Modane, une fois défini le nombre de descenderies.
- Etudes particulières : simulation d'évacuation des voyageurs, essais de feu,
- Analyse exhaustive des divers scénarios d'incident et des mesures de secours correspondantes, composition du train de secours léger.
- Prescriptions définitives concernant le matériel roulant et les installations fixes.
- Information complémentaire sur les grands tunnels existants (Seikan...)

Recherches aérodynamiques et thermiques :

- Essais en vraie grandeur pour caler les paramètres des modèles mathématiques et physiques (résistance à l'avancement, effets thermiques ...).
- Optimisation des sections libres d'air en fonction des types de trafic retenus.
- Optimisation du profil en long du tunnel.
- Modélisation précise des processus de ventilation et désenfumage.

- Etudes particulières : configuration des têtes du tunnel pour limiter les effets aérodynamiques, phénomènes acoustiques et aérodynamiques pour les poses de voies sur dalle, ...
- Dimensionnement des installations de refroidissement et de désenfumage, et des locaux techniques correspondants.

Technique ouvrages d'art, tunnel de base :

- Galeries de reconnaissance de la Praz, Modane et Val Clarea : préparation des marchés, suivi des travaux, exploitation des résultats.
- Puits de reconnaissance à la tête Saint-Jean-de-Maurienne.
- Forages et géophysique complémentaires dans le secteur des descenderies et de la gare de service de Modane, et au coeur du massif d'Ambin.
- Etude de l'organisation générale du chantier : accès, viabilité, ventilation, évacuation des matériaux, réemploi ou mise en dépôt des déblais.
- Etude technique d'utilisation éventuelle de tunneliers.
- Optimisation du tracé, du profil en long et de l'implantation de la gare de Modane et des têtes du tunnel et des descenderies.

Lignes d'accès :

- Sondages et géophysique pour les tunnels, viaducs et terrassements.
- Etudes trajectographiques, hydrauliques, de stabilité de versant.
- Etudes de tracé.

Etudes d'environnement :

- Etudes particulières aux chantiers des galeries de reconnaissance.
- Etudes relatives à la réutilisation ou à la mise en dépôt des déblais, au réaménagement des sites.
- Organisation des chantiers, techniques d'évacuation des déblais.
- Etudes d'évaluation environnementale dans le cadre des études préliminaires des lignes d'accès.





ANNEXES

- Annexe 1 : Etudes d'exploitation
- Annexe 2 : Recherches bibliographiques dans le domaine de la sécurité en tunnel.
- Annexe 3 : Description des dispositions proposées pour la sécurité des personnes dans le tunnel de base.
- Annexe 4 : Etudes aérodynamiques et thermiques.
- Annexe 5 : Reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques pour le tunnel de base.
- Annexe 6 : Modalités d'exécution du tunnel de base.
- Annexe 7 : Schémas synoptiques du projet de tunnel et plannings indicatifs.
- Annexe 8 : Carte et coupe géologiques au niveau du tunnel de base.
- Annexe 9 : Tracé et profil en long du tunnel de base, premières études.

